



**LORRANA BICHOFF**

**MATERIAIS ALTERNATIVOS NA PRODUÇÃO DE  
FIBROCIMENTO EXTRUDADO**

**LAVRAS-MG  
2022**

**LORRANA BICHOFF**

**MATERIAIS ALTERNATIVOS NA PRODUÇÃO DE FIBROCIMENTO  
EXTRUDADO**

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

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2022**

**LORRANA BICHOFF**

**MATERIAIS ALTERNATIVOS NA PRODUÇÃO DE FIBROCIMENTO  
EXTRUDADO**

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

APROVADA em 08 de setembro de 2022.

Dr. Rafael Farinassi Mendes

Ma. Carolina Rezende Pinto Narciso

Ma. Queilla Santos Viana

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2022**

## AGRADECIMENTOS

Bráulio Oliveira, um amigo querido e doutorando da UFSCar, possui uma série chamada “O que os materiais nos ensinam sobre a vida?”, e em um dos seus capítulos sobre compósitos, ele diz: “Como humanos, também temos naturezas diferentes uns dos outros, mas isso não nos impede de buscar combinar nossas melhores características em busca de um bem maior. A Vida não deveria se tratar de propriedades mais ou menos desejadas, e sim de um projeto muito mais colaborativo que competitivo. Sim, ainda temos inúmeros desafios no mundo dos compósitos, mas também sempre teremos em busca de nossas melhores versões como pessoas. Mas, se é verdade que na vida estamos sempre aprendendo, também é verdade que estamos sempre ensinando. Que nossa estrutura seja sempre fortalecida com o apoio de quem encontramos pelos caminhos. Que juntos possamos ser muito mais fortes que a soma dos nossos limites individuais. Que sejamos, a cada dia, um pouco mais Engenheiros de Materiais.”.

Com essa mensagem, eu inicio meu agradecimento aos pilares que compõem a minha estrutura: a minha família, amigos e professores. Muitas pessoas contribuíram para as minhas camadas e algumas não estão mais aqui para ler esse agradecimento, mas permanecerão para sempre na estrutura do meu coração.

Agradeço aos meus pais, Marília e Leandro, por serem meus primeiros mestres e melhores amigos. A minha irmã Lorena, por estar sempre ao meu lado, aos meus avós Antônia, Pedro e Ciça, por todo o amor e confiança. Ao meu namorado Leonardo, por me apoiar e incentivar. Agradeço ainda à Tati, pela parceria e muita ajuda. Às minhas amigas Taynara, Maria Clara, Rayne e Carol, que são sol para os dias nublados e por fim, mas não menos importante, ao meu professor Rafael, porque sem você ninguém estaria lendo esse texto agora. Desejo que todo mundo tenha um Rafael na faculdade, porque além de ser um excelente profissional, você é um ser humano de muita luz.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar o efeito da utilização de materiais alternativos como reforços para a produção de fibrocimento extrudado. Foram avaliadas os reforços com celulose branqueada, papelão, embalagem cartonada do tipo Tetra Pak® e papel couchê. Para obtenção da matriz cimentícia foram utilizados o cimento Portland CPV - ARI, calcário moído e os aditivos hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e poliéter carboxílico (ADVA). Os compósitos foram avaliados quanto às propriedades físicas de densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente e ensaio mecânico de flexão, obtendo as propriedades de módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e tenacidade. Os resultados da caracterização física mostraram que o compósito reforçado com caixa Tetra Pak® obteve a maior porosidade aparente, dessa forma inferindo um maior volume de vazios dentro do material. Em contrapartida, apresentou também maior densidade aparente, inferindo então que houve uma baixa dispersão desse reforço e que sua composição afeta essa propriedade, pois possui material metálico. O compósito com reforço de papel couchê obteve maior absorção de água, porém ainda dentro do limite tolerado por norma, dessa forma inferindo maior hidrofiliabilidade do reforço. Os resultados mecânicos mostraram que esse tratamento também obteve os maiores módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e tenacidade, dessa forma concluindo que este compósito obteve melhores características de interface fibra matriz, melhores mecanismos de tenacificação e desempenho em flexão. Por fim, os tratamentos com celulose branqueada, papelão e papel couchê atenderam aos critérios das normas apresentando potencial para serem utilizados como reforços em fibrocimentos.

**Palavras chaves: Compósitos. Celulose branqueada. Papelão. Caixa Tetra Pak. Papel couchê.**

## ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the use of alternative materials as reinforcement in the production of extruded fibrocement, such as bleached cellulose, cardboard, Tetra Pak® box and coated paper, adding 5% by weight, in a cementitious matrix, obtaining a composite. In this way, Portland cement CPV - ARI was used as a cement matrix due to the lower amount of additives and as a partial replacement of cement, ground limestone with the purpose of reducing costs, in addition to the additive hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) and polyether carboxylic (ADVA). The composites were produced on a laboratory scale by the extrusion process, where all components were placed in a planetary mixer for homogenization and extruded in a rectangular shape. The results of the physical characterization showed that the composite reinforced with Tetra Pak® box obtained the highest apparent porosity, thus inferring a greater volume of voids within the material and also had the highest apparent density, inferring then that there was a low dispersion of this reinforcement and that its composition affects this property. The composite reinforced with coated paper obtained greater water absorption, thus inferring greater hydrophilicity of the reinforcement. The mechanical results showed that the composite with coated paper reinforcement, despite the high water absorption, obtained the highest modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE) and toughness, thus concluding that this composite obtained better characteristics of matrix fiber interface, better toughening mechanisms and flexural performance. Therefore, the composites with bleached cellulose, cardboard and coated paper attended the norms of the norms presenting potential to be used as reinforcements in fiber cements.

**Keywords: Composites. Bleached cellulose. Cardboard. Tetra Pak® box. Couche paper.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da extrusora.....	16
Figura 2 - Representação esquemática da atuação das fibras em trincas.....	17
Figura 3 - Fluxograma dos processos de produção do papelão.....	21
Figura 4 - Embalagens Tetra Pak.....	23
Figura 5 - Esquema de produção dos compósitos extrudados.....	27
Figura 6 - Porosidade aparente das amostras de fibrocimento.....	30
Figura 7 - Absorção de água das amostras de fibrocimento.....	31
Figura 8 - Densidade aparente das amostras de fibrocimento.....	32
Figura 9 - Módulo de ruptura para as amostras de fibrocimento.....	34
Figura 10 - Módulo de elasticidade para as amostras de fibrocimento.....	36
Figura 11 - Tenacidade das amostras de fibrocimento.....	38

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição das misturas utilizadas na extrusão dos compósitos.....	26
Tabela 2 - Equações para determinação da propriedade físicas.....	28
Tabela 3 - Equações para determinação das propriedades mecânicas.....	29
Tabela 4 - MOR pela norma ABNT NBR 15498.....	35



## LISTA DE SIGLAS

AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADVA	Adição de Poliéter carboxílico
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DA	Densidade aparente
HPMC	Adição de Hidroxipropilmetilcelulose
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MOE	Módulo de tenacidade
MOR	Módulo de ruptura
PA	Porosidade aparente
PET	Poli (tereftalato de etila)
PP	Polipropileno
PVA	Polivinilálcool
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_i$  Massa imersa

$M_u$  Massa úmida

$M_s$  Massa seca

$\rho_w$  Densidade do líquido

$C_{m\acute{a}x}$  Carga máxima aplicada

$b$  Largura do corpo-de-prova;

$d$  Espessura do corpo-de-prova

$L_v$  Vão principal

$C_1$  Carga obtida dentro do regime elástico e menor que a  $C_2$

$C_2$  Carga obtida dentro do regime elástico e maior que a  $C_1$

$D_1$  Deformação obtida dentro do regime elástico e menor que a  $D_2$

$D_2$  Deformação obtida dentro do regime elástico e maior que a  $D_1$

b.h área da seção transversal da amostra

RPM Rotações por minuto

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1 Fibrocimento sem amianto	13
2.2 A extrusão como método de produção de fibrocimentos	14
2.3 O papel das fibras no fibrocimento	15
2.4 Materiais alternativos para utilização como reforço	16
2.4.1 Celulose branqueada	16
2.4.2 Papelão	19
2.4.3 Caixa Tetra Pak®	21
2.4.4 Papel couchê	22
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
3.1 Obtenção das fibras	23
3.2 Produção dos compósitos de fibrocimento	24
3.3 Caracterização física	25
3.4 Caracterização mecânica	26
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>28</b>
4.1 Caracterização física	28
4.1.1 Densidade aparente	28
4.1.2 Porosidade aparente	29
4.2.2 Absorção de água	31
4.2 Caracterização mecânica	32
4.2.1 Módulo de ruptura	32
4.2.2 Módulo de elasticidade	34
4.2.3 Tenacidade	36
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais com base cimentícia são amplamente utilizados na indústria, sobretudo na de construção civil, em aplicações estruturais. Isso se deve porque, apesar de serem materiais cerâmicos e terem limitações em algumas propriedades em decorrência do grau de fragilidade, esse desempenho pode ser facilmente aprimorado com a adição de novos materiais nessas matrizes na forma de fibras. Dessa forma, aços, vidros, fibras poliméricas e naturais são os principais materiais utilizados (BALEIA et al, 2021).

A necessidade de se obter materiais que atendam às novas exigências do mercado, apresentando características específicas e adequadas para cada uso é grande e tem sido de muita relevância, tanto para os produtores como para os consumidores, que buscam cada vez mais produtos que sejam mais duráveis, eficientes e ecologicamente corretos (BERNADI, 2003).

Quando adicionadas fibras à matriz cimentícia, é possível melhorar suas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, à flexão e ao impacto, podendo ainda diminuir os efeitos de uma ruptura brusca, pois o seu comportamento diante a fissuração também é alterado (AGOPYAN e SAVASTANO JR., 2007).

O amianto em forma de fibras foi um dos primeiros reforços industriais a ser utilizado em compósitos com matriz cimentícia, sendo desenvolvido por volta de 1900. Isto porque ele possui diversas propriedades interessantes como bom isolamento térmico e acústico, boa resistência física e mecânica, além de ter alta durabilidade e baixo custo (BENTUR; MENDES, 2007), (WINKLER, 2015).

Apesar dessas vantagens conhecidas do amianto, pesquisas sobre compósitos de fibrocimento reforçados com fibras alternativas a este material vem crescendo muito nos últimos anos, uma vez que o amianto apresenta potencial cancerígeno, e está relacionado a várias doenças pulmonares irreversíveis, sem que haja um limite seguro em que se possa ser exposto, e portanto teve seu uso proibido no Brasil e no mundo (TONOLI et. al., 2011; CASTRO, GIANNASI, NOVELLO, 2003; INSTITUTO BRASILEIRO DO CRISOTILA, 2012).

Sendo a indústria da construção um dos setores que mais possui consumo de energia, recursos e emissão de dióxido de carbono, o desenvolvimento de materiais com bom desempenho e ecologicamente corretos têm sido buscados cada vez mais. Para tanto a utilização de resíduos industriais, subprodutos e recursos renováveis para este

desenvolvimento se tornou necessária em toda a indústria de manufatura (HOSPODAROVA, 2018).

A utilização de materiais celulósicos como reforço no desenvolvimento de compósitos com matriz cimentícia tem sido cada vez mais explorado, tanto para materiais naturais como residuais e reciclados. Ainda que esses materiais provenientes de resíduos não tenham sido muito explorados, faz-se necessário uma maior investigação dos mesmos devido ao sucesso da aplicação das fibras celulósicas naturais (HOSPODAROVA et al., 2018).

Segundo a Associação Nacional do Fibrocimento (ANF), as aplicações dos mesmos na construção civil é feita, principalmente, pelos compósitos com proporções variadas de cimento Portland, agregados minerais moídos, como o calcário, fibra de celulose e os fios sintéticos de reforço como polipropileno (PP) e poliálcool vinílico (PVA) em substituição total dos fibrocimento utilizando amianto, que foi proibido desde 2017 no Brasil.

Taiwo et al. (2021) estudaram as propriedades mecânicas e características de absorção de água de fibras naturais como juta e fibra de bananeira em substituição ao amianto nos compósitos e os resultados obtidos para os compósitos produzidos com uma mistura de ambas as fibras possui propriedades semelhantes aos compósitos utilizando fibras de amianto.

Aliando à necessidade de se utilizar fibras alternativas ao amianto e ao PP, em decorrência do alto custo agregado ao produto final, como reforço para as matrizes cimentícias, a preocupação em se utilizar resíduos oriundos de processos industriais e também de reciclar produtos que perdem os seus valores após serem descartados, o trabalho propõe a confecção de fibrocimentos utilizando como reforços o papelão, a caixa tipo tetra pak e o papel couchê avaliando o desempenho de cada um em um comparativo com o padrão de reforço contendo celulose branqueada, que já é utilizada na indústria. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar o efeito da utilização de reforços alternativos para produção de fibrocimento extrudado.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Fibrocimento sem amianto**

O fibrocimento é caracterizado por ser um material com matriz de cimento e aditivos reforçados com fibras, que são distribuídas pela matriz. Por muito tempo o amianto foi o material mais utilizado como reforço para o fibrocimento, entretanto, devido às suas características nocivas à saúde a busca por materiais alternativos tem se tornado cada vez maior (CORREIA; SANTOS; JUNIOR, 2018).

O amianto, também conhecido como asbesto, é o nome popular para os minerais de silicato fibrosos de ocorrência natural e foi a primeira fibra a ser utilizada como reforço na fabricação do fibrocimento. Esses minerais se dividem em dois grupos: serpentinas (crisotila) e anfibólios (tremolita, actinolita, antofilita, amosita e crocidolita) (CETESB, 2020).

Com o surgimento de inúmeros casos de doenças, como câncer, seguido pela luta e banimento do mineral em diversos países do mundo, realizaram-se estudos que demonstraram o seu impacto nocivo para a saúde, tanto através da inalação das fibras dispersas no ar quanto pelo manuseio do material (LANDIMA, 2020).

Na década de 90, o Supremo Tribunal Federal proibiu a exploração de variações do amianto, permitindo apenas o tipo crisotila. Em 2004, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 348, de 16 de agosto de 2004, altera a Resolução CONAMA nº347 e inclui o amianto na classificação de resíduos perigosos e em 2017, o STF proíbe também o crisotila (LEMOS, 2019).

Dessa forma, vários setores, especialmente o de construção civil, se reinventaram para angariar alternativas mais sustentáveis para a produção de fibrocimento, garantindo as propriedades desejadas sem que o valor final dos produtos fosse impactado. A utilização de fibras convencionais como aço e vidro, fibras sintéticas como polipropileno e nylon e fibras naturais como celulose, sisal entre outras foram sendo cada vez mais exploradas (BENTUR; MENDES, 2007; LEMOS, 2019).

No Brasil a Saint-Gobain Brasilit iniciou os estudos com novos materiais para substituição do amianto a partir de 1998 onde foram testados papel usado, celulose virgem, fibras acrílicas e poliamidas e fibras de vidro. Com aquisição da SIL-Società Italiana foi desenvolvido então produtos com fibra de polivinilálcool (PVA) e lançados

no mercado em 2001. Por fim, estudos com polipropileno (PP) em parceria com o Centre de Recherche de Matériaux da Saint-Gobain na França foram trazidos e aplicados nesses materiais a partir de 2003. Apesar de todo o desenvolvimento, ainda há a necessidade de redução de custos desses materiais, principalmente do PP que é mais utilizado, visto que, a utilização desses insumos na fabricação aumenta em média 50% o custo do produto final, além do custo energético total (BRUM et al, 2016).

A utilização de fibras vegetais/naturais como reforço em compósitos cimentícios vem sendo intensificada, uma vez que apresentam vantagens como recurso renovável e baixo custo. Além disso, a utilização de resíduos para obtenção desses reforços é um campo atrativo devido ao aumento da conscientização sobre o meio ambiente atualmente (MOHR; EL-ASHKAR; KURTIS, 2004; BENTCHIKOU et al, 2012).

A utilização de fibras vegetais em fibrocimentos resulta em compósitos que apresentam significativa melhora nas propriedades como tenacidade, ductilidade, capacidade de flexão e resistência à trincas se comparadas aos materiais sem reforços. Apesar disso, há uma grande preocupação com sua durabilidade em longo prazo, devido à alcalinidade da matriz, que faz com que haja um enfraquecimento das fibras (ARDANUY; CLARAMUNT; FILHO, 2015).

Os problemas de durabilidade das fibras estão associados ao ataque alcalino da matriz nos reforços, os quais faz com que haja migração de produtos de hidratação para os lúmens e lamela fazendo com que haja uma variação de volume das fibras devido à alta absorção de água. Dessa forma, há uma diminuição do *pull-out* da fibra e também um aumento da fratura da mesma, resultando então em diminuição de resistência e tenacidade pós-fissuração e, conseqüentemente, uma redução de efetividade das mesmas (FILHO et al, 2009).

## **2.2 A extrusão como método de produção de fibrocimentos**

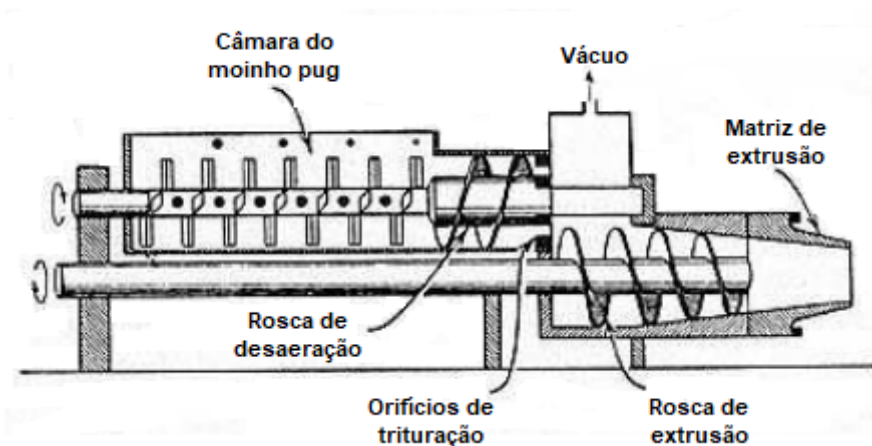
O processo de extrusão é caracterizado pela passagem forçada da mistura plástica através de uma matriz, sendo necessário uma mistura altamente viscosa que seja resistente à segregação durante a compressão no processamento. É uma técnica com alta produtividade possibilitando a produção de peças grandes e pequenas (REED, 1995).

De acordo com Silva (2015), a fabricação do fibrocimento através do processo de extrusão consiste em uma alternativa econômica e traz vantagens, como a utilização de maquinário mais simples, facilitando a produção contínua, maior compactação da

mistura, possibilidade de alinhamento parcial das fibras e menor custo de investimento inicial.

A extrusora possui uma rosca do tipo sem fim e consiste em um moinho de *pug*, uma seção de desaeração, uma câmara de compactação e uma matriz conforme mostra a Figura 2 (NASSAR et al, 2021).

Figura 1 - Esquema da extrusora.



Fonte: Adaptado de Reed et al (1995).

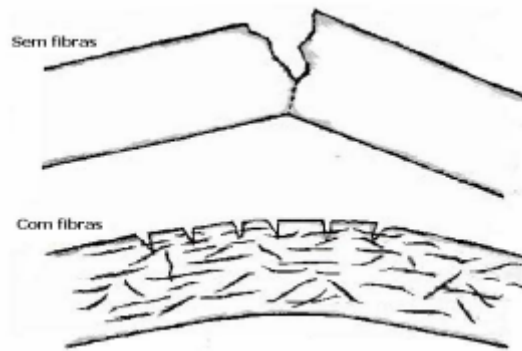
Inicialmente é feita a alimentação do material até o moinho pug que faz a ação de mistura e homogeneização, posteriormente o material passa pela rosca de desaeração e, com o vácuo aplicado juntamente, faz a remoção do máximo de ar possível. Na rosca de extrusão o material é então pré-compactado para retirada dos espaços vazios e, por fim, o material é forçado pela matriz de extrusão já com sua geometria e o produto é então cortado no comprimento definido e, finalmente, curado (NASSAR et al, 2021).

### 2.3 O papel das fibras no fibrocimento

O reforço com fibras em materiais compósitos faz com que haja uma transferência de tensão à matriz de modo que elas auxiliam na redução de abertura de trincas, isto porque atuam como pontos de fixação das trincas reduzindo sua propagação, conforme mostrado na Figura 3. Além disso, em matrizes cimentícias as fibras atuam com um aumento da energia de fratura. Apesar disso, é necessário que as mesmas possuam tamanho e dispersão adequados, além de uma interação físico-química na interface (IORIO et al, 2021).



**Figura 2 - Representação esquemática da atuação das fibras em trincas.**



Fonte: Adaptado de Tonoli, 2006.

Comparados aos cimentos comuns, sem reforço, os compósitos de fibrocimento possuem melhores propriedades como tenacidade, ductilidade, capacidade de flexão e resistência à fissuras. Além disso, a utilização de fibras vegetais tem a vantagem de serem uma opção sustentável, com ampla disponibilidade e baixo custo (FERREIRA et al, 2015; HAMZEH et al, 2013).

Dessa forma, vários tipos de fibras como fibras de aço, vidro, carbono, poliméricas e vegetais têm sido utilizadas como reforço para fibrocimento, de modo que há uma gama de estudos sendo feitos para analisar as propriedades finais destes compósitos (IORIO et al, 2021).

#### **2.4 Materiais alternativos para utilização como reforço**

A utilização de fibras como reforço em materiais possui primeiros relatos em histórico bíblico onde tijolos de barro eram reforçados com palha. Entretanto, a utilização mais ampla foi a do amianto reforçando materiais cimentícios por volta de 1900. Atualmente, vários tipos de fibras são utilizadas como reforço com epóxis, plástico e cerâmicas e a busca por materiais alternativos é contínua. Sendo assim, o uso de recursos disponíveis como reforço, os quais podem introduzir valor agregado ao produto, é importante. Além de melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos fibrocimentos, também podem ser ecologicamente corretos e terem baixo custo (BENTUR; MINDESS, 2007; MOHAMMADKAZEMI et al, 2015).

### **2.4.1 Celulose branqueada**

Descoberta em 1838 por Payen, a celulose é um polissacarídeo orgânico linear, insolúvel em água e hidrofílica (WANG; TAVAKOLI; TANG, 2019). Sendo metade da biomassa produzida por organismos que realizam fotossíntese constituída de celulose, é estimado que cerca de 100 bilhões de toneladas de celulose são produzidas por vegetais ao ano (SOUZA; CARVALHO; VALADARES, 2015).

O setor de papel e celulose desempenha um papel importante na economia nacional e também para o cenário mundial. Seu consumo energético passou de 5% do consumo final industrial em 1970 para 16% em 2020. Isto é devido à receita gerada, aos elevados investimentos, ao impacto que esse setor tem sobre os outros diversos setores econômicos, tanto para os que se encontram antes quanto depois de sua cadeia produtiva, assim como sua influência na geração e consumo de energia e ao impacto social e ambiental positivos (BRASIL, 2022).

Mesmo com a eclosão da pandemia do Covid-19, a produção de celulose no Brasil apresentou um crescimento de 6,6% em 2020 com relação à 2019, configurando o setor como um que rapidamente se organizou para atender as demandas do novo formato de consumo dos diversos setores econômicos, incluindo as famílias. O país se manteve como segundo maior produtor mundial, atingindo 21,0 milhões de toneladas fabricadas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. O Brasil é reconhecido pela qualidade e origem sustentável e certificada da sua celulose, e este fato contribuiu para manter a indústria nacional como uma grande referência no mundo (BRASIL, 2022).

A celulose possui estrutura única e diversas propriedades como biocompatibilidade, renovabilidade, não toxicidade e sustentável, devido a isso é amplamente utilizada em vários setores. O processo de branqueamento da celulose é um tratamento físico-químico no qual as propriedades são melhoradas devido ao alcance de pureza da celulose (HE et al, 2021; D'ALMEIDA, 1988).

Através da utilização de estágios de branqueamento adequados, a resistência mecânica da celulose pode ser alavancada, fazendo com que ocorra o mínimo de degradação das cadeias celulósicas. A etapa de branqueamento da celulose tende a reduzir o potencial de resistência da fibra. Isto ocorre devido, principalmente, ao uso de reagentes como oxigênio e seus derivados (ozônio, peróxido de hidrogênio e perácidos) os quais são menos seletivos para a preservação do potencial de sua resistência (COMELATO, 2011).

A associação de reagentes seletivos com reagentes mais agressivos aos carboidratos promove a viabilidade de se produzir celulose branqueada, atentando-se aos custos, eficiências e resultados objetivos dos processos. Deve-se ressaltar que as pastas celulósicas branqueadas possuem apenas polissacarídeos, sendo eles celulose e hemicelulose, pois a maior parte de lignina é removida durante o processo de branqueamento (PHILIPP; D'ALMEIDA, 1988; COMELATO, 2011).

No mercado de materiais de fibrocimento há mais de 40 anos, a Infibra já comercializa materiais utilizando fibra de celulose. A substituição do amianto por uma mistura de fibras sintéticas e celulose veio de uma tecnologia europeia adquirida pela empresa. Apesar disso, sua produção ainda é limitada devido ao custo elevado de matérias primas provenientes de importação. A busca por desenvolvimento de materiais independentes de exportação, várias pesquisas são realizadas pela empresa. Uma das alternativas abordadas é a carbonatação acelerada para as fibras vegetais sem utilização de fibras sintéticas, isso reduz custos e promovem uma sustentabilidade devido a não utilização de produtos derivados do petróleo mas ainda não é possível utilizar em escala industrial. Apenas fibrocimentos reforçados com fibras vegetais curadas por autocura já existem em mercados internacionais (MARTIN, 2012).

Bentchikou et al (2012) estudaram o efeito de fibras de celulose recicladas em fibrocimentos, os resultados mostraram que houve um melhor comportamento de isolamento térmico, diminuição da densidade aparente com aumento do teor de fibras e a inserção de até 16% de fibras a resistência à compressão atendeu os requisitos da American Society for Testing and Materials (ASTM) C109 (2001).

Gorzelanzyk, Schabowicz e Szymków (2020) investigaram o efeito do uso de fibras de celulose de papel reciclado juntamente com PVA em fibrocimento, os resultados mostraram que houve diminuição do módulo de ruptura e aumento da absorção de água proporcionais à porcentagem de fibras inseridas. Dessa forma, os autores relatam que a utilização de fibras de celulose recicladas devem ser inferiores a 5-10% do total de fibras de PVA.

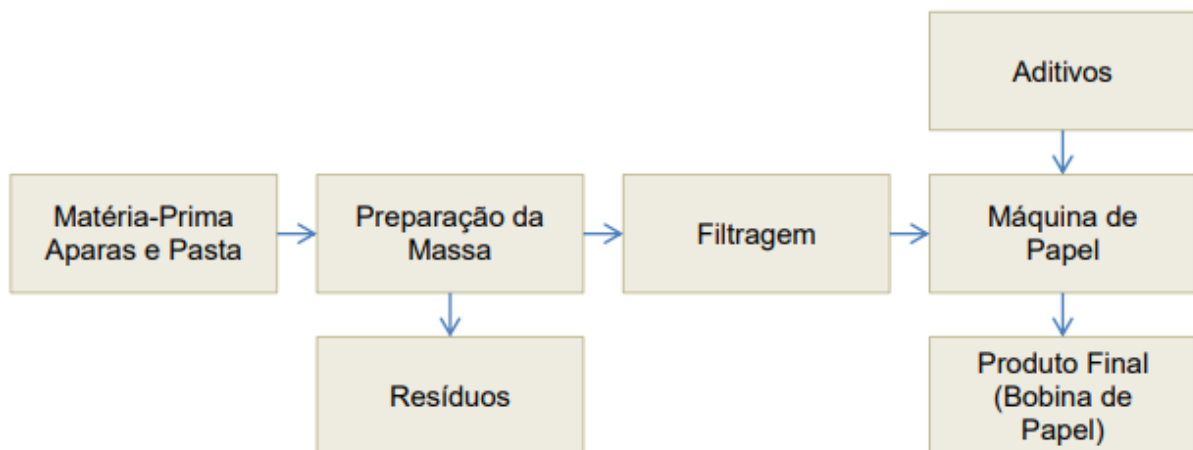
Pesquisas realizadas nos últimos anos utilizando fibras de celulose em matriz de cimento mostram que as polpas de madeira macia e sisal são os materiais mais estudados, entretanto tem-se também uma grande gama de pesquisas com polpas de eucalipto, resíduos agrícolas, algodão, linho e cânhamo. A preocupação com a durabilidade do compósito levou os pesquisadores a desenvolverem diversos tratamentos como adições pozolânicas, refinamento das polpas com tratamentos

químicos e de hornificação que resultaram na produção de compósitos com boas propriedades mecânicas e durabilidade. Entretanto deve-se ressaltar que estudos para melhorar ainda mais a durabilidade devem ser feitos sem que haja aumento de custos de produção para o desenvolvimento de tecnologias verdes (ARDANUY; CLARAMUNT; FILHO, 2015).

#### 2.4.2 Papelão

O papelão é fabricado a partir de uma pasta químico-mecânica e/ou aparas de papel de reciclagem que constituem a matéria prima, esta então é inserida em um equipamento chamado Hidrapulper onde há o acréscimo de água para desagregar a matéria prima formando um suspensão fibrosa. Além disso, nesta etapa há a remoção de impurezas através do processo de pré-depuração e então é finalmente depurada. O material então vai para os engrossadores onde acontece a extração da água e então vai para os tanques e equipamentos de refino e, por fim, vai para a máquina de papel. A máquina de papel consiste em uma caixa de entrada, mesa plana, prensas, secadores e enroladeira. Os processos estão exibidos na Figura 4 (ROBERT, 2007).

Figura 3 - Fluxograma dos processos de produção do papelão.



Fonte: Robert, 2007.

Sendo um material durável, biodegradável, renovável e reciclável o papelão tem uma taxa de reciclagem de 77,3% de modo que pode ser colocado novamente na cadeia

de produção fazendo com que seja produzido com até 66,9% de fibras recicladas (EMPAPEL, 2022).

As fibras que constituem o papelão, contém matéria celulósica na qual possui características de não periculosidade, não abrasivo, biodegradável, alta resistência, baixa densidade e baixo custo. A utilização de fibras provenientes do papelão em fibrocimentos foram feitas recentemente, entretanto sua aplicação comercial não obteve sucesso pelo fato das propriedades mecânicas ficarem reduzidas (HAIGH et al, 2022).

Visto que o papelão possui os componentes lignina e hemicelulose há uma diferença de comportamento se comparado àqueles materiais que passam pelo processo de branqueamento. Isto porque uma matriz alcalina na presença de hemicelulose e lignina pode resultar em decomposição dos mesmos fazendo com que haja um enfraquecimento da estrutura do reforço diminuindo sua interação com a matriz e afetando, também, a hidratação do cimento e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas (HAIGH et al, 2021; PICKERING; EFENDY; LE, 2016; KHORAMI et al, 2017).

Ahmad et al (2021) utilizaram resíduos de papelão como reforço em fibrocimento em diferentes proporções e os resultados mostraram que o aumento da quantidade de reforço diminuiu as propriedades mecânicas do compósito, entretanto concluíram que esses materiais podem ser utilizados em aplicações não estruturais.

Khorami, Ganjian e Srivastav (2016) estudaram o efeito da incorporação de fibras celulósicas extraídas de resíduos de papelão juntamente com fibras acrílicas e de polipropileno em fibrocimento, os resultados mostraram que os compósitos fabricados com as fibras de resíduos de papelão juntamente com os de polipropileno obtiveram melhores desempenhos em tenacidade e ductilidade e os compósitos fabricados com fibras de resíduo de papelão juntamente com as acrílicas obtiveram melhor desempenho de resistência à flexão. Ainda relataram que o aumento da quantidade de fibra acrílica no compósito pode melhorar as propriedades tenacidade e ductilidade dos mesmos.

Khorami e Ganjian (2013) estudaram o efeito do teor de fibras de resíduo de papelão na resistência à flexão do fibrocimento e o efeito da sílica ativa e do carbonato de cálcio nos mesmos, os resultados mostraram que as fibras obtiveram boa dispersão na matriz. Além disso, houve um aumento da resistência à flexão com a utilização de fibras a 8% em peso do cimento, sendo 2,5 vezes maior que o tratamento de controle, além disso o aumento de 10% de pó de calcário e 6% de sílica ativa melhora o comportamento de flexão. No presente estudo, a utilização de 8% de fibras de resíduo

de papelão, 3% de sílica ativa e 10% de pó de calcário resultou em maiores módulos de ruptura e ductilidade.

### 2.4.3 Caixa Tetra Pak®

Embalagens Tetra Pak® são materiais plásticos em multicamadas conforme mostrado na Figura 3.5, elas são amplamente utilizadas em muitos países. O material é constituído de cerca de 75% de papelão, 20% de polietileno de baixa densidade (LDPE) e 5% de folha de alumínio. O papelão confere características de estabilidade, resistência e suavidade de superfície, o LDPE de barreira de vapor de água e interface para multicamada entre o papelão e a folha de alumínio, esta última possui propriedades de barreira para o oxigênio e a luz (XU et al, 2016).

**Figura 4 - Embalagens Tetra Pak®.**



Fonte: Site Tetra Pak®, 2022.

Visto que as embalagens plásticas multicamadas representam um número significativo em resíduos sólidos urbanos, é importante fazer a sua reciclagem para reaproveitamento de recurso tanto na cadeia produtiva para novas embalagens quanto em outras aplicações. Cerca de 33,33% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil são

devido a essas embalagens multicamadas. (LOPES; FELISBERTI, 2006; SILVA et al, 2015).

Pesquisas sobre a produção de compósitos utilizando embalagens Tetra Pak® recicladas ainda são bastante limitadas. Além disso, a reciclagem das embalagens por separação de componentes exige uma primeira etapa com introdução do material em hidrapulper para retirada das fibras de papel e uma segunda etapa para separação do plástico e do metal, ou como forma alternativa um beneficiamento duplo para aplicação em outros materiais (FOTI et al, 2019; ARAÚJO; MORAIS; ALTIDES, 2008).

Silva et al (2015) estudaram o reaproveitamento de resíduos de embalagens Tetra Pak® em coberturas, os resultados mostraram que as telhas utilizando os resíduos obteve um bom desempenho térmico, reduziu os valores médios de índice de temperatura e umidade e carga térmica de radiação. Dessa forma, podem ser bem aplicadas em coberturas como material alternativo.

Barrera et al (2015) investigaram a utilização de resíduos de celulose provenientes de embalagens Tetra Pak® como reforço em concreto de cimento e a influência da radiação gama, os resultados mostraram que a adição de 3% em peso da celulose residual aumentou 45% da resistência à compressão do compósito e 47% do módulo de elasticidade com radiação gama. Entretanto, o compósito não irradiado obteve diminuição nas propriedades mecânicas.

Araújo, Morais e Altides (2008) estudaram as propriedades físico-químicas e mecânicas de telhas alternativas utilizando o polímero e o metal das embalagens Tetra Pak® e comparando-as com as telhas de fibrocimento convencionais, os resultados mostraram que as propriedades em tração e flexão foram maiores, a densidade absoluta e a absorção de água foram menores. Dessa forma, concluíram que essas telhas podem substituir as telhas convencionais e a contribuição ambiental é muito significativa.

#### **2.4.4 Papel couchê**

A transformação do papel couchê se dá a partir de um papel-base com composição de celulose química branqueada e revestimento com uma camada de pigmentos, ligantes e outros aditivos. O revestimento pode ser feito em um lado ou nos dois lados e o papel pode ser produzido de modo que seja brilhante ou mate (COSTA et al, 2021).

Surgido na indústria gráfica em 1860, o papel couchê é muito utilizado na produção de folhetos, catálogos, revistas, convites, cartazes etc. A palavra couchê é de origem francesa e significa camada. No Brasil, as primeiras empresas que produziram o papel couchê foram a Klabin, Suzano, Simão e Pirahy por volta da década de 60 (LEOCÁDIO, 2020; UFPR, 2022).

As propriedades necessárias no papel couchê são resistência da folha seca, resistência interna, lisura na superfície, resistência da superfície, porosidade adequada, absorção, estabilidade dimensional, opacidade e coeficiente de dispersão de luz. Dessa forma, garantindo um desempenho satisfatório para seus fins (COSTA et al, 2021). Na literatura, não foram encontrados estudos que utilizassem esse material como reforço em fibrocimento.



### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Obtenção das fibras**

Neste estudo, foram utilizadas como reforço a celulose branqueada, o papelão, a caixa do tipo Tetra Pak e o papel couchê.

O papelão e o papel couchê foram reaproveitados do próprio laboratório de compósitos, enquanto as caixas Tetra Pak® foram doadas pela Associação de Catadores de Lavras (Acamar). A polpa celulósica proveniente da madeira de eucalipto, doada pela empresa Suzano, em forma de folha, foi hidratada com água por 24 horas e após essa hidratação foi retirado o excesso de água. Em seguida, a celulose foi processada em uma bateadeira planetária para garantir um material mais homogêneo.

Os demais materiais utilizados apenas foram processados em um moinho martelo, posteriormente fez-se a abertura do papel em água, pesados de acordo com a formulação utilizada na produção e processados em bateadeira para homogeneização.

#### **3.2 Produção dos compósitos de fibrocimento**

A composição das misturas utilizadas para produção dos compósitos está apresentada na Tabela 1. Como matrizes cimentícias foram utilizados o cimento Portland CPV – ARI, segundo a norma NBR 5733 (ABNT, 2014). Este cimento foi escolhido, pois possui uma menor quantidade de adições como a sílica cristalina e pozolanas, evitando, assim, efeitos combinados de minerais, além de se tratar de um processo de extrusão.

O calcário agrícola moído foi utilizado em substituição parcial do cimento Portland no intuito de reduzir custos no processo de produção dos compósitos, como é normalmente empregado na indústria de fibrocimento. A fim de auxiliar na reologia da mistura, foram utilizados os aditivos hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) em relação à massa do cimento, para retenção de água e o aditivo poliéter carboxílico (ADVA), também em relação à massa do cimento, o qual reduz o atrito do compósito com a boquilha da extrusora.

**Tabela 1 - Composição das misturas utilizadas na extrusão dos compósitos.**

TRATAMENTO	CIMENTO (% EM MASSA)	CALCÁRIO (% EM MASSA)	REFORÇO	HPMC (% EM MASSA)	ADVA (% EM MASSA)
1	66,5	28,5	Celulose branqueada - 5%	1%	1%
2	66,5	28,5	Papelão - 5%	1%	1%
3	66,5	28,5	Caixa Tetra Pak® - 5%	1%	1%
4	66,5	28,5	Papel couchê - 5%	1%	1%

Fonte: Próprio autor.

Foram produzidas sete amostras para cada composição de compósitos em escala laboratorial pelo processo de extrusão. Os materiais sólidos foram colocados em uma bateadeira planetária com velocidade de rotação de 140 RPM, permanecendo por 5 minutos a fim de se obter uma homogeneização adequada, posteriormente foram adicionados os líquidos e misturados por mais 5 minutos.

Após a retirada da massa da bateadeira, a mesma foi levada à extrusora da marca VERDÉS, modelo 51, com velocidade de rotação na rosca helicoidal de 32 RPM. Para uma melhor uniformidade de homogeneização da massa, a mesma foi processada 3 vezes antes de se obter os corpos de prova definitivos. Os compósitos foram confeccionados no formato retangular, com dimensões aproximadas de 200 mm x 30 mm x 20 mm, comprimento, largura e espessura, respectivamente.

Após a moldagem, os compósitos foram armazenados em sacos plásticos selados para cura em temperatura ambiente e ambiente saturado de umidade por 28 dias. A Figura 6 exibe o esquema de produção dos compósitos.

**Figura 5 - Esquema de produção dos compósitos extrudados.**



Fonte: Próprio autor.

### 3.3 Caracterização física

Os valores médios de absorção de água (AA), densidade aparente (DA), e porosidade aparente (PA) foram obtidos, seguindo-se os procedimentos especificados pela norma C 948- 81 (ASTM, 2016). Para a determinação dessas propriedades, os sete corpos de prova foram submersos em água à temperatura ambiente por período de 24 horas, sendo determinada a massa imersa ( $M_i$ ) e a massa úmida ( $M_u$ ). Logo após, as amostras foram secas em estufa por um período de 24 horas, a uma temperatura em torno de  $75 \pm 5$  °C, sendo as amostras posteriormente pesadas para determinação da massa seca ( $M_s$ ).

Para determinação das propriedades físicas, foram utilizadas as equações da Tabela 2.

**Tabela 2 - Equações para determinação da propriedade físicas.**

Propriedades físicas	Equações
Densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	$\left( \frac{M_u}{M_u - M_i} \right) \cdot \rho_w$
Absorção de água (%)	$\left( \frac{M_u - M_s}{M_s} \right) \cdot 100$
Porosidade aparente (%)	$\left( \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \right) \cdot 100$

Fonte: Próprio autor.

Onde:

$M_u$  = Massa úmida;

$M_i$  = Massa imersa;

$M_s$  = Massa seca;

$\rho_w$  = Densidade do líquido em que as amostras foram imersas.

### 3.4 Caracterização mecânica

Para determinação das propriedades mecânicas dos compósitos, os ensaios de flexão estática foram executados em uma máquina universal de testes universal da marca TIME GROUP, modelo WDW 20E, equipada com célula de carga de 20kN. Foram realizados os ensaios de Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade

(MOE) e Tenacidade à flexão estática, os quais seguiram os procedimentos descritos em “International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures” - RILEM (1984). As equações utilizadas para os cálculos dos valores médios de MOE, MOR e Tenacidade à flexão estática estão apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Equações para determinação das propriedades mecânicas.**

<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Equações</b>
Módulo de ruptura (MPa)	$\frac{3.C_{máx}.L_v}{2.b.d^2}$
Módulo de elasticidade (MPa)	$\frac{L_v^3.(C_2-C_1)}{4.(D_2-D_1).b.d^3}$
Tenacidade (Kj/m <sup>2</sup> )	$\frac{energia\ absorvida}{b.h}$

Fonte: Próprio autor.

Onde:

$C_{máx}$  = Carga máxima aplicada (Newton (N));

$b$  = Largura do corpo-de-prova (milímetros (mm));

$d$  = Espessura do corpo de prova (mm);

$L_v$  = vão principal (mm);

$C_1$  = Carga obtida dentro do regime elástico e menor que a  $C_2$  (N);

$C_2$  = Carga obtida dentro do regime elástico e maior que a  $C_1$  (N);

$D_1$  = Deformação obtida dentro do regime elástico e menor que a  $D_2$  (mm);

$D_2$  = Deformação obtida dentro do regime elástico e maior que a  $D_1$  (mm);

$b.h$  = área da seção transversal da amostra (metros (m)).

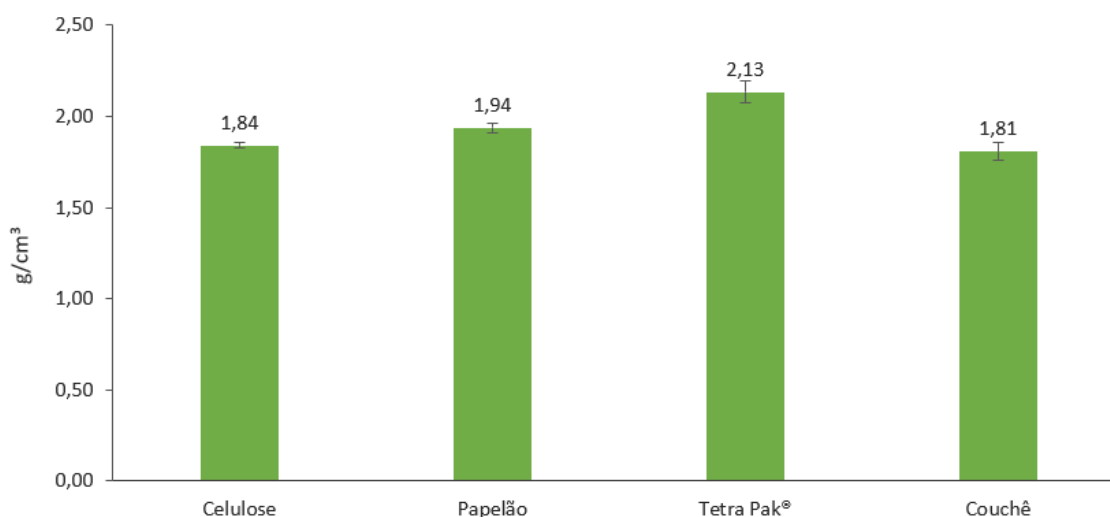
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização física

#### 4.1.1 Densidade aparente

Foi observado, como mostra a Figura 8, que o compósito reforçado com caixa Tetra Pak® obteve a maior densidade aparente dentre todos os tratamentos, sendo 13,62% maior do que o compósito com celulose branqueada, 8,92% maior do que o compósito com papelão e 15,02% maior do que o compósito com papel couchê.

Figura 8 - Densidade aparente das amostras de fibrocimento.



Fonte: Próprio autor.

A menor densidade aparente do compósito com reforço de papel couchê está corroborando com os resultados anteriores os quais o mesmo obteve a segunda maior porosidade aparente e absorção de água, isto porque uma maior quantidade de vazios resulta também em uma menor densidade aparente. Entretanto, o compósito com caixa Tetra Pak®, que deveria seguir a mesma tendência, apresentou a maior densidade aparente que pode estar relacionada à sua composição. Isso pode estar relacionado ao fato da mesma possuir em sua composição o alumínio, que pode fazer com haja um aumento de densidade do compósito. Além disso, pode estar relacionado a uma baixa interação com a matriz, em função das características de superfície do material.

O compósito com reforço de papel couchê obteve menor densidade aparente entre todos os tratamentos avaliados, o que está associado a possível menor interação reforço-matriz ou a menor dispersão na matriz cimentícia, conforme discutido na anteriormente e como consequência a segunda maior porosidade.

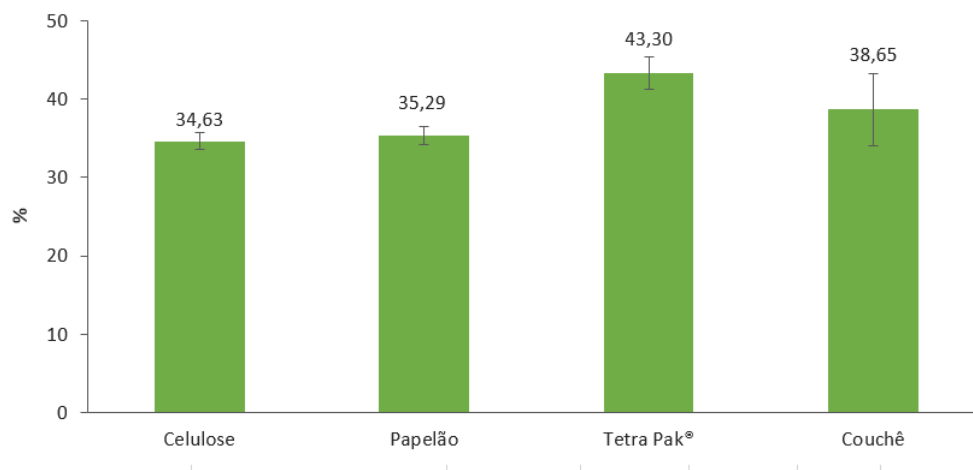
Lertwattanaruk e Suntijitto (2015) estudaram as propriedades do fibrocimento com fibra de coco e fibra de dendê e os resultados mostraram que a densidade do compósito aumenta de acordo com a densidade da fibra, ou seja, a fibra de dendê possuindo maior densidade do que a fibra de coco resultou em maior densidade aparente do material.

Um grande volume vazio dentro do compósito resulta em uma maior absorção de água, além disso a densidade do mesmo diminui quando há um aumento desses espaços livres dentro do material. Ademais, as características dos reforços afetam as propriedades dos compósitos assim como a quantidade inserida no mesmo, a qual dificilmente ultrapassa 5%. Finalmente, uma boa dispersão do reforço na matriz faz com haja uma diminuição de vazios no compósito e também uma melhor interface das fases (HAIGH et al, 2022; ROCHA et al, (2022)

#### 4.1.2 Porosidade aparente

Os compósitos reforçados com papelão e celulose apresentaram as menores porosidades, sendo estas inferiores às observadas para os fibrocimentos com resíduos de caixas de Tetra Pak® e papel couchê, podendo ser observado na Figura 6.

**Figura 6 - Porosidade aparente das amostras de fibrocimento.**



Fonte: Próprio autor.

Os compósitos com reforço de caixa Tetra Pak® e papel couchê obtiveram as maiores porosidades aparente, que pode estar relacionado a uma maior quantidade de defeitos na microestrutura ou a uma baixa dispersão do reforço na matriz, fazendo com que haja maiores volumes livres. A maior porosidade dos tratamentos de caixa Tetra Pak e papel couchê podem estar relacionados à composição química dos mesmos, já que o primeiro possui LDPE e alumínio em sua composição e o segundo possui uma camada composta por carbonato de cálcio, látex, caulim e aditivos que podem afetar na interação com a matriz ou na sua dispersão.

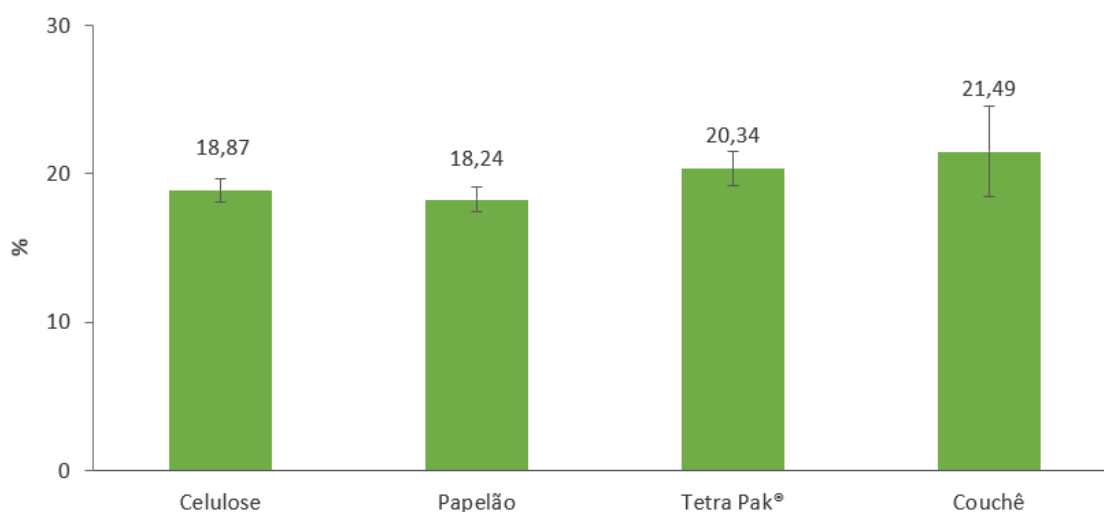
Alexandre (2018) estudou a modificação superficial da polpa de celulose como reforço em fibrocimento, os resultados mostraram que menores valores de porosidade aparente para os compósitos estavam relacionados com a diminuição de vazios entre os componentes do mesmo.

Segundo Santos, Teixeira e Savastano Jr. os produtos de hidratação do cimento podem preencher os poros de fibrocimentos reforçados com materiais celulósicos devido os produtos de hidratação que precipitam nas zonas interfaciais de reforço e matriz. Dessa forma, pode-se afirmar que a porosidade depende da relação reforço-matriz obtidas, o que foi verificado neste estudo.

#### **4.2.2 Absorção de água**

Na Figura 7, estão explanados os valores obtidos no ensaio para absorção de água, de modo que os fibrocimentos com papelão obtiveram valores inferiores de absorção que os fibrocimentos produzidos com celulose, se destacando entre os materiais de reforço para essa propriedade. Os fibrocimentos com papel couchê obtiveram os maiores valores de absorção de água, o que pode estar associado à porosidade dos compósitos.

**Figura 7 - Absorção de água das amostras de fibrocimento.**



Fonte: Próprio autor.

Apesar dos maiores valores de porosidade observados para os fibrocimentos com resíduos de caixas Tetra Pak® (Figura 7), tais compósitos obtiveram valores intermediários de absorção de água, o que está associado ao fato de ser o material de reforço menos higroscópico, isto porque o mesmo possui LDPE em suas composição que é um polímero com característica hidrofóbica, além do alumínio que não apresenta absorção de água.

Reforços hidrofílicos podem absorver íons alcalinos da matriz cimentícia fazendo com que haja uma maior absorção de água e volume de vazios aparentes. Além disso, a formação de aglomerados do reforço na microestrutura pode resultar em vazios e defeitos microestruturais, resultando também em maior AA e PA (FONSECA et al., 2019). Desta forma, a composição química do papelão com maiores quantidade de lignina, material hidrofóbico, associado a adequada obtenção de fibras no seu processamento e conseqüentemente uma melhor interação com a matriz, possibilitou que os fibrocimentos com papelão obtivessem bons resultados de absorção de água.

Segundo a norma NBR 7581-1 (ABNT, 2014) o valor máximo de absorção de água para telhas onduladas de fibrocimento é de 37%, dessa forma todos os compósitos produzidos neste estudo obtiveram valores satisfatórios dentro da norma.

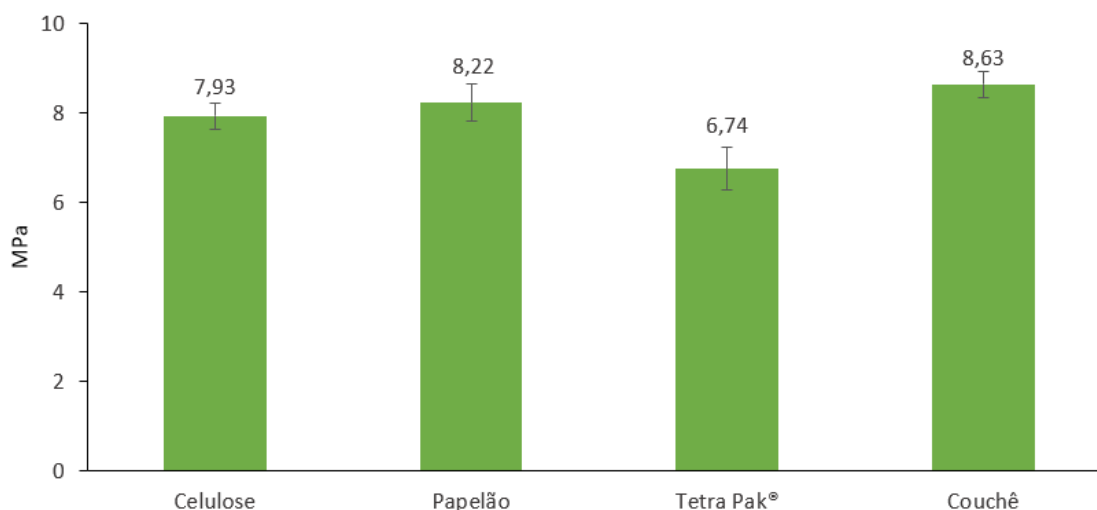


## 4.2 Caracterização mecânica

### 4.2.1 Módulo de ruptura

Sendo o módulo de ruptura a tensão máxima antes da fratura, o papel couchê foi o reforço que obteve o melhor desempenho, com 8,63 MPa, seguido do tratamento com reforço de papelão, com 8,22 MPa, enquanto os fibrocimentos com celulose, comumente produzidos, apresentou 7,93 MPa, como é possível observar na Figura 9.

Figura 9 - Módulo de ruptura para as amostras de fibrocimento.



Fonte: Próprio autor.

Apenas o compósito com caixa Tetra Pak® obteve um baixo MOR comparado aos demais tratamentos, que pode estar relacionado à alta porosidade e absorção de água do mesmo. Isto porque tais propriedades afetam a microestrutura do compósito gerando defeitos, além disso pode estar relacionado à baixa dispersão do reforço o que pode acarretar em maior baixa eficiência do mesmo.

A norma NBR 15498 (ABNT, 2021) determina valores de MOR para os fibrocimentos, conforme mostrado na Tabela 4. Para tanto há uma categoria de aplicações onde: a categoria A se refere aos compósitos de aplicação externa que são sujeitos a intempéries, a categoria B se refere aos compósitos de aplicação externa sem exposição à intempéries e a categoria C se refere aos compósitos de aplicação interna.

**Tabela 4 - MOR pela norma ABNT NBR 15498.**

Módulo de ruptura (MPa)	Categoria	
	A e B	C
Classe 1	4	4
Classe 2	7	7
Classe 3	13	10
Classe 4	18	16
Classe 5	24	22

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15498, 2007.

Dessa forma, tanto para as categorias A e B, quanto para a categoria C, os fibrocimentos aqui estudados estão na classe 2, exceto o compósito com reforço de caixa Tetra Pak que não atingiu os valores para a classe 2 e são classificados como classe 1.

Taiwo et al. (2021) estudaram as propriedades mecânicas do fibrocimento utilizando fibras naturais de banana e juta, os resultados mostraram que a adição de fibras resultou em maiores módulos de ruptura do que o material sem fibras.

Khorami e Ganjian (2011) estudaram o comportamento à flexão do fibrocimento reforçado com resíduos agrícolas de bagaço de cana e trigo e o resíduo florestal de eucalipto, os resultados mostraram que houve uma melhora significativa nas propriedades mecânicas, sendo a proporção de 4% em peso de reforço o melhor resultado obtido. Concluíram que os melhores desempenhos foram obtidos pelos reforços de bagaço de cana, em que a utilização de 4% em peso obteve uma flexão máxima de 6 MPa sendo 50% a mais do que a amostra controle.

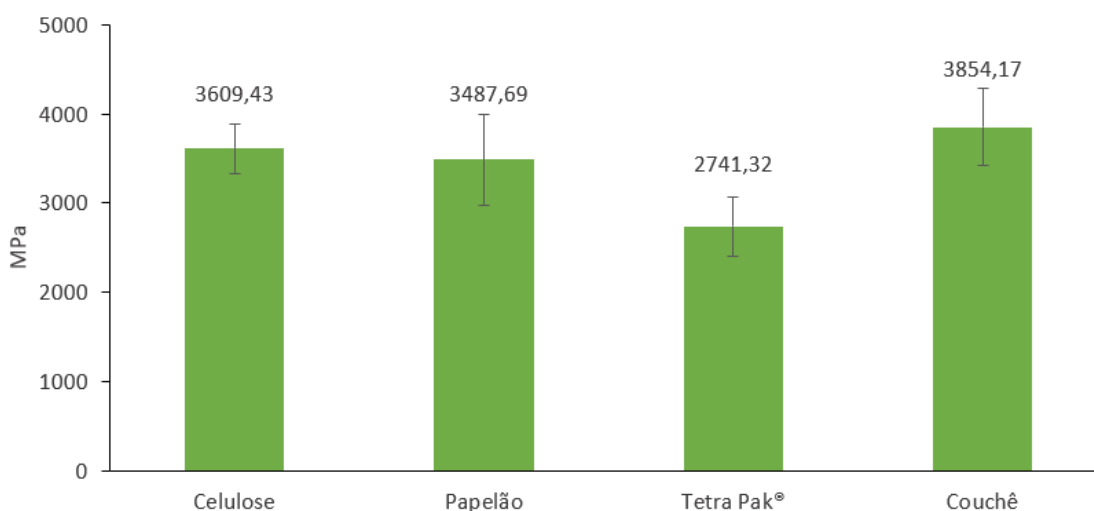
Compósitos de matriz cimentícia com reforço de polpa celulósica de sacos de cimento obtiveram resultados de MOR de 6,34MPa após o envelhecimento acelerado, o qual é diminuído quando comparado aos 11,77MPa de MOR em compósitos com 28 dias de idade. Esses valores sugerem uma degradação facilitada das fibras (MÁRMOL et al, 2013).

Hwang et al (2016) estudaram compósitos de fibrocimento com fibra de coco, os resultados mostraram que a adição de 4% de fibras no compósito procedeu um aumento do MOR de 6,8MPa para 8,8MPa.

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade

Assim como no MOR, o reforço de papel couchê obteve o melhor desempenho para o módulo de elasticidade, sugerindo que esse reforço proporcionou maior rigidez ao compósito, além disso o reforço com celulose branqueada e papelão também mostraram um bom comportamento de rigidez. Maior MOE indica um melhor desempenho mecânico do compósito, além disso pode estar relacionado a uma melhor interação entre fibra e matriz e seus mecanismos de tenacificação. Na Figura 10 estão apresentados os valores para MOE dos tratamentos realizados.

**Figura 10 - Módulo de elasticidade para as amostras de fibrocimento.**



Fonte: Próprio autor.

MOE é uma faixa elástica da curva típica de flexão e é caracterizada pelo comportamento linear de matriz e fibra até o momento em que a matriz inicia as rachaduras, após isso o comportamento muda e há formação de diversas trincas até a sua ruptura fazendo com que haja uma queda das propriedades mecânicas devido ao aumento das trincas e, finalmente, sua fissura (SILVA et al, 2010).

Mohammadkazemi et al (2015) estudaram o efeito do reforço de nanocelulose bacteriana em fibrocimento e relataram que a formação de aglomerados resultou em diminuição do MOR e MOE. Além disso, o mecanismo de tenacificação entre fibra e matriz é dependente da interação das mesmas e o módulo de ruptura está relacionado

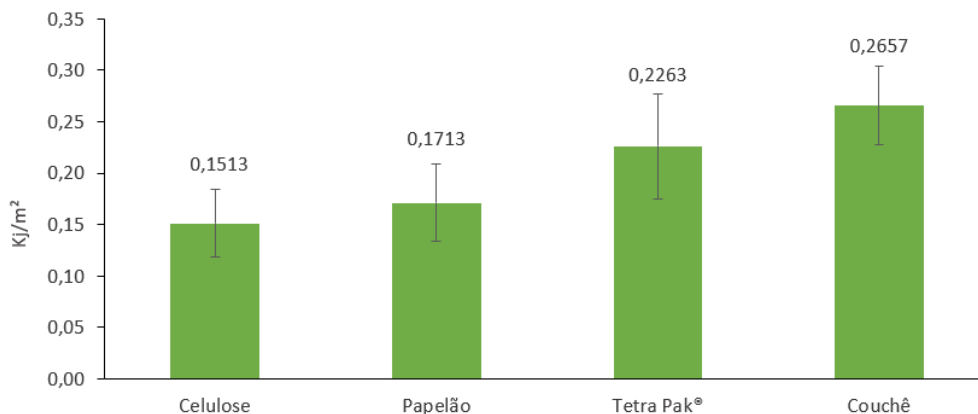
com esses mecanismos e com a resistência mecânica da matriz (ALMEIDA et al, 2010; HABLITZEL; GARCIA; HOTZA, 2011).

Soydan et al (2018) estudaram a utilização de fibras de celulose não reciclada, eucalipto e araucária em fibrocimento através de sistemas sem autoclave, os resultados mostraram uma queda do MOE para as amostras utilizando fibras de celulose virgem após 7 dias de cura e ficaram praticamente constantes à 3,79GPa. Entretanto os valores de MOE para o compósito utilizando eucalipto houve aumento de 4,65GPa para 5,76GPa de 7 a 15 dias de cura, sendo estabilizado em 5,28GPa após 28 dias de cura e os valores para o compósito utilizando araucária foi observado um aumento de 5,43GPa em 7 dias para 5,66GPa em 15 dias, mas houve uma queda em 28 dias para 4,89GPa.

#### 4.2.3 Tenacidade

A tenacidade está associada a capacidade do material resistir a trincas e aos mecanismos de tenacificação dos reforços, a tenacidade da celulose branqueada e do papelão foram as menores, indicando que os compósitos com esses reforços obtiveram menos mecanismos de tenacificação como deslizamento e rompimento direto das fibras, indicando uma maior aderência desses reforços com a matriz. Dessa forma, sugere-se que o papel couchê, que obteve a maior tenacidade, foi o reforço com melhor desempenho nos mecanismos de tenacificação, apresentando a maior tenacidade entre os demais, seguido pelo compósito com reforço de caixa Tetra Pak® de modo que estes devido à maior porosidade ativou mecanismos de tenacificação aumentando também a tenacidade. Na Figura 11, pode-se observar o comportamento dos tratamentos realizados para o ensaio de tenacidade.

**Figura 11 - Tenacidade das amostras de fibrocimento.**



Fonseca et al (2016) estudaram o efeito da adição de micro/nanofibrilas celulósicas em fibrocimento extrudados. Eles relataram que a absorção de energia está relacionada com os mecanismos de tenacificação do compósito, que são alguns fenômenos que estão relacionados com a fratura do material como desprendimento, arrancamento e ponte. Sendo assim, uma menor atuação desses mecanismos durante a flexão resulta em uma menor absorção de energia.

Quando um material compósito reforçado com fibras é submetido a uma carga, acontece uma transferência de tensão da matriz para o reforço. Dessa forma, os mecanismos de tenacificação como a descolagem da fibra gera grandes perdas de energia fazendo que haja um aumento da tenacidade à fratura do material (SAVASTANO JR.; WARDEN; COUTTS, 2000).

Além disso, pode-se inferir que a interação matriz e fibra está relacionada à maiores propriedades mecânicas, isto porque a boa interação resulta em efetivos mecanismos de tenacificação e, conseqüentemente, melhora as propriedades mecânicas dos compósitos. Sendo assim, o compósito reforçado com papel couchê foi o que obteve melhor desempenho devido às suas boas propriedades mecânicas em MOR, MOE e tenacidade, além disso, tem a melhor combinação de fratura e deslizamento das fibras e também atendeu às normas.

Uma boa interação fibra matriz depende das características individuais de cada fase, dessa forma alguns mecanismos como incrustação da matriz na superfície das fibras, torção das fibras, extremidades fraturadas das fibras são indicações de trabalho conjunto das mesmas. Portanto, a fratura e o arrancamento das fibras coexistem como mecanismos de tenacificação que fazem que haja boa resistência à flexão e tenacidade (SAVASTANO JR.; WARDEN; COUTTS, 2005).

Coutts e Warden (1992) estudaram o efeito da polpa de sisal como reforço em fibrocimentos, os resultados mostraram que a adição de 8% da polpa em massa gera um aumento de 50 a 60 vezes de tenacidade à fratura em relação à matriz pura. Além disso, a resistência à flexão do compósito é cerca de 2 vezes maior do que a da matriz.

## 5 CONCLUSÕES

As análises das propriedades físicas mostraram uma similaridade entre o padrão com celulose e os reforços de papelão e papel couchê, isto porque os reforços dos compósitos dos mesmos possuem semelhança química com o padrão afetando de forma parecida a matriz e o material como um todo. Para a análise de porosidade, o reforço com Tetra Pak® apresentou os maiores valores, 8,67% maior que o padrão, seguido do papel couchê, com 4,02%. Ambos também apresentaram os maiores valores de absorção de água, de modo que o couchê registrou 2,62% a mais que o padrão, enquanto o tratamento com Tetra Pak®, 1,47%. Já para a análise de densidade aparente, o reforço com Tetra Pak® apresentou o maior valor, seguido do papelão, enquanto o papel couchê apresentou um valor levemente mais baixo do que o padrão com celulose.

As análises das propriedades mecânicas mostraram que o tratamento com papel couchê foi o que obteve melhor desempenho e se destacou, apresentando um aumento do MOR de 8,4% e MOE de 6,8% quando comparado ao padrão com celulose branqueada. Para o ensaio de tenacidade, couchê também apresentando o valor maior, quase o dobro do padrão. De modo geral, celulose e papelão também apresentaram bons resultados mecânicos, enquanto Tetra Pak® saiu inferior.

Foi verificado que as propriedades físicas afetam diretamente as propriedades mecânicas, dessa forma os materiais que obtiveram melhor desempenho físico também obtiveram melhores performance mecânica. Os tratamentos com papelão e papel couchê obtiveram propriedades semelhantes ao padrão com celulose branqueada, mostrando que esses compósitos possuem boa interação entre as fases e boa dispersão, apenas a tenacidade teve diferença significativa que pode estar relacionada à camada de revestimento do reforço. Exceto pela tenacidade, as propriedades mecânicas do tratamento com Tetra Pak® foram as menores, mostrando que houve uma baixa interação de fases fazendo com que haja deslizamento da fibra e, portanto, maior tenacidade.

Finalmente, pode-se concluir que os tratamentos com celulose branqueada, papelão e papel couchê atenderam aos critérios das normas, apresentando potencial para serem utilizados como reforços com fibrocimento. O compósito com reforço de Tetra Pak® não atendeu às normas para a classe 2 de fibrocimento, porém atendeu às normas para a classe 1, podendo ser utilizado para aplicações não estruturais.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a repetição do experimento com papel couchê para possibilitar a caracterização das amostras e análise estatística, bem como entender melhor a relação da composição física do material com todas as propriedades apresentadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr., H. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais e suas aplicações. In: **Tecnologia e materiais alternativos de construção**. FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. (coord.). Campinas: UNICAMP, 2003. P.121-142.

AHMAD, A. et al. Mechanical properties and durability of boardcrete blocks prepared from recycled cardboard. **Journal of Building Engineering**, vol. 33, 2021.

ALEXANDRE, S.A. **Modificação superficial de pola de celulose para melhoria de durabilidade de fibrocimentos**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade Federal de Lavras, Engenharia e Biomateriais (Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos). Lavras: p. 132, 2018.

ALMEIDA, A.E.F.S. et al. Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas: Accelerated carbonation in the early ages of cellulose pulps reinforced cement composites. **Ambiente Construído**, vol. 10, p. 233-246, 20

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C 948-81**: Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken, 2001.

AMIANTO. Ficha de Informação Toxicológica. **CETESB**, 2020. Disponível em: <[https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/08/Amianto\\_Asbesto.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/08/Amianto_Asbesto.pdf)>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

ARAÚJO, D.C.; MORAIS, C.R.S.; ALTIDES, M.E.D. Avaliação mecânica e físico-química entre telhas convencionais e alternativas usadas em habitações populares. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, vol. 3, p. 50-56, 2008.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; FILHO, R.D.T. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, vol. 79, p. 115-128, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: Placa plana cimentícia sem amianto: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12800**: Telha de fibrocimento, tipo pequenas ondas. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FIBROCIMENTO (ANF). Disponível em: <<https://anf-br.org/anf/>>. Acesso em: 17 de agosto de 2022.

BALEA, A. et al. Recycled Fibers for Sustainable Hybrid Fiber Cement Based Material: A Review. **Materials**, vol. 14, 2021.

BARRERA, G.M. et al. Waste Cellulose from Tetra Pak Packages as Reinforcement of Cement Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2015.

BENTCHIKOU, M. et al. Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. **Construction and Building Materials**, vol. 34, p. 451-456, 2012.

BERNARDI, S.T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 179, 2003.



BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **A indústria de papel e celulose no Brasil e no mundo: Panorama geral**. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-650/Pulp%20and%20paper\\_EPE+IEA\\_Portugu%C3%AAs\\_2022\\_01\\_25\\_IBA.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-650/Pulp%20and%20paper_EPE+IEA_Portugu%C3%AAs_2022_01_25_IBA.pdf)> Acesso em: 24 de junho de 2022.

BRUM, S.C. Amianto: a bioética entre o custo e a toxicidade. *Revista Eletrônica Teccen*, p.52-56, 2016.

COMELATO, J.S. **Efeito de reagentes de branqueamento nas propriedades físicas e mecânicas da polpa de celulose kraft de eucalipto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p. 20, 2011.

CORREIA, V.C.; SANTOS, S.F.; JUNIOR, H.S. **Vegetable fiber as reinforcing elements for cement based composite in housing applications – a Brazilian experience**. *MATEC Web of Conferences*, vol. 149, 2018.

COSTA, C.C. et al. Aspectos gerais sobre três tipos de papéis. *Scientific Electronic Archives*, vol. 14, 2021.

COUTTS, R.S.P.; WARDEN, P.G. Sisal Pulp reinforced cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, vol. 14, p. 17-21, 1992.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel, Volume I: Tecnologia de fabricação de pasta celulósica**, 2 ed. São Paulo: SENAI e IPT, 1988.

EMPAPEL. **Papel é o insumo mais sustentável e menos agressivo ao meio ambiente**. Disponível em: <<http://empapel.org.br/noticias/papel-e-o-insumo-mais-sustentavel-e-menos-agressivo-ao-meio-ambiente/>>. Acesso em: 25 de julho de 2022.

FERREIRA, S.R. et al. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. *Construction and Building Materials*, vol. 101, p. 730-740, 2015.

FILHO, R.D.T. et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, vol. 23, p. 2409-2420, 2009.

FONSECA, C.S. et al. Micro/nanofibrilas celulósicas de eucalyptus em fibrocimentos extrudados. *CERNE*, vol. 22, p. 59-68, 2016.

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

FONSECA, R.P.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M. Mechanical Properties of Mortars Reinforced with Amazon Rainforest Natural Fibers. *Materials*, vol. 14, 2021.

FOTI, D. et al. Microstructure and compressive strength of gypsum-bonded composites with papers, paperboards and Tetra Pak recycled materials. *Journal of Wood Science*, vol. 65, 2019.

GIANNASI, F.; THÉBAUD-MONY, A. Occupation exposures to asbestos in Brazil. *International Journal of Occupation and Environment Health*, Philadelphia, v.3, n.2, p.150-7, 1997.

GORZELANCZYK, T.; ZCHABOWICZ, K.; SZYMKÓW, M. Tests of Fiber Cement Materials Containing Recycled Cellulose Fibers. *Materials*, vol. 13, 2020.

HABLITZEL, M.P.; GARCIA, D.E.; HOTZA, D. Interfaces fracas em compósitos de matriz cerâmica de alumina/alumina. *Revista Matéria*, vol. 16, p. 788-794, 2011.

HAMZEH, Y. et al. Study on the effects of white rice husk ash and fibrous materials additions on some properties of fiber–cement composites. *Journal of Environmental Management*, vol. 117, p. 263-267, 2013.

- HAIGH, R. et al. A review of the mechanical and durability performance of kraft-fibre reinforced mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 297, 2021.
- HAIGH, R. et al. The mechanical performance of recycled cardboard kraft fibres within cement and concrete composites. **Construction and Building Materials**, vol. 317, 2022.
- HARRISON, P.T.C.; LEVY, L.S.; PRATRICK, G.; PIGOTT, G.H.; SMITH, L.L. Coparative hazards of chrysotile asbestos and its substitutes: a European perspective. **Environ Health Perspect**, vol. 107, p. 607-11, 1999.
- HE, X. et al. Cellulose and cellulose derivatives: Different colloidal states and food-related applications. **Carbohydrate Polymers**, vol. 255, 2021.
- HISTÓRIA DO REVESTIMENTO DE PAPEL E CARTÃO NO BRASIL. **Madeira UFPR**. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/revestimentobr.pdf>>. Acesso em: 26 de julho de 2022.
- HOSPODAROVA, V. et al. Investigation of Waste Paper Cellulosic Fibers Utilization into Cement Based Building Materials. **Buildings**, vol. 8, 2018.
- HWANG, C. et al. Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, vol. 127, p. 984-992, 2016.
- IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, vol. 24, p. 171-180, 2010.
- IORIO, M. et al. Reinforcement-matrix interactions and their consequences on the mechanical behavior of basalt fibers-cement composites. **Construction and Building Materials**, vol. 309, 2021.
- KHORAMI, M.; GANJIAN, E. Comparing flexural behaviour of fibre–cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. **Construction and Building Materials**, vol. 25, p. 3661-3667, 2011.
- KHORAMI, M.; GANJIAN, E. The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. **Construction and Building Materials**, vol. 46, p. 142-149, 2013.
- KHORAMI, M.; GANJIAN, E.; SRIVASTAV, A. Feasibility Study on Production of Fiber Cement Board Using Waste Kraft Pulp in Corporation with Polypropylene and Acrylic Fibers. **Materials Today: Proceeding**, vol. 3, p. 376-380, 2016.
- KHORAMI, M. et al. Utilisation of waste cardboard and Nano silica fume in the production of fibre cement board reinforced by glass fibres. **Construction and Building Materials**, vol. 152, p. 746-755, 2017.
- LANDIMA, F.A.A.; D'ARÊDE, C.O.; MORAES, L.R.S. Amianto não! O manejo das telhas de fibrocimento e perspectivas para desamiantização da Universidade Federal da Bahia, em Salvador-Bahia. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, vol. 8, p. 15-26, 2020.
- LEMOS, V. Saúde ou emprego? O dilema do amianto, que fez Goiás desafiar STF. **BBC News Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-49589925>>. Acesso em: 24 de junho de 2022.
- LEOCÁDIO, R. Futura Express. **O que é papel couchê? - Aprenda a definição e as principais aplicações**, 2020. Disponível em: <<https://www.futuraexpress.com.br/blog/o-que-e-papel-couche/>>. Acesso em: 25 de julho de 2022.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. **Construction and Building Materials**, vol. 94, p. 664-669, 2015.

LOPES, C.M.A.; FELISBERTI, M.I. Composite of low-density polyethylene and aluminum obtained from the recycling of postconsumer aseptic packaging. **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 101, 2006.

MACVIVAR, R.; MATUANA, L. M.; BALATINECZ, J.J. Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**; 21:189-96. 1999.

MÁRMOL, G. et al. Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags. **Industrial Crops and Products**, vol. 49, p. 422-427, 2013.

MARTIN, C. Celulose de fibra curta conquista novos mercados: Indústria de construção civil aposta no potencial da matéria-prima para fabricar produtos mais sustentáveis. **Negócios e Mercado**, 2012. Disponível em: <[http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1330005146\\_601d9e8a5b2c1c79a4d7b6b79b88b8a4\\_545252130.pdf](http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1330005146_601d9e8a5b2c1c79a4d7b6b79b88b8a4_545252130.pdf)>. Acesso em: 04 de agosto de 2022.

MHAMMADKAZEMI, F. et al. Manufacturing of bacterial nano-cellulose reinforced fiber–cement composites. **Construction and Building Materials**, vol. 101, p. 958-964, 2015.

MOHR, B.J.; EL-ASHKAR, N.H.; KURTIS, K.E. Fiber-Cement Composites for Housing Construction: State-of-the-Art Review . **Materials Science**, vol. 38, 2004.

NASSAR, R. et al. Evaluation of refined cement-based matrix systems for extrusion of wood fiber cement. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 15, 2021.

OLIVEIRA, W.J. **O efeito da celulose microfibrilada no fibrocimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 105, 2022.

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2 ed. São Paulo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), 1988. 559 p. vol. 1.

PICKERING, K.L.; EFENDY, M.G.A.; LE, T.M.A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 83, p. 98-112, 2016.

REED, J.S. **Principles of ceramics processing**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DES RECHESCHES SR LEX MATERIAUX ET LES CONSTRUCTION (RILEM). **RILEM 49TFR**: Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. *MateriauxetConstructions*, v.17, n.102, p. 441-456, 1984.

ROBERT, N.T.F. Produção de embalagem de papel. Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro - **REDETEC**, 2007. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MjAw>>. Acesso em: 25 de julho de 2022.

ROCHA, D.L. et al. A Review of the Use of Natural Fibers in Cement Composites: Concepts, Applications and Brazilian History. **Polymers**, vol. 14, 2022.

RODRIGUES, M., BERALDO, A.L., SAVASTANO Jr., SANTOS, S.F. Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.12, p.1347-1353, 2013.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, vol. 22, p. 379-384, 2000.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. **Cement and Concrete Composites**, vol. 27, p. 583-592, 2005.

SILVA, D.W. **Propriedades físico-mecânicas de fibrocimento reforçado com fibras de eucalipto tratadas termicamente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais com área de concentração em compósitos e nanocompósitos) Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 66, 2015.

SILVA, F.A. et al. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. **Construction and Building Materials**, vol. 24, p. 777-785, 2010.

SILVA, K.C.P. et al. Reaproveitamento de resíduos de embalagens Tetra Pak-® em coberturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 19, p. 58-63, 2015.

SOUZA, D.T.; CARVALHO, L.A.; VALADARES, L.F. Celulose: Pontos de vista. Brasília: **Embrapa**, 2015. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1034962/1/doc18.pdf>>. Acesso em 23 de julho de 2022.

TAIWO, A.S. et al. Mechanical properties and water-absorption characteristics of selected natural fibers as a replacement for asbestos. **Materials and technology**, vol. 55, p. 97-104, 2021.

TETRA PAK. **Embalagens cartonadas**. Disponível em: <<https://www.tetrapak.com/pt-br/solutions/packaging>>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

TONOLI, G. H. D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – Universidade de São Paulo.

XU, C. et al. Flame retardancy and mechanical properties of thermal plastic composite panels made from Tetra Pak waste and high-density polyethylene. **Polymer Composites**, vol. 37, 2016.

WANG, J.; TAVAKOLI, J.; TANG, Y. Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review. **Carbohydrate Polymers**, vol. 219, p. 63-76, 2019.