



RODRIGO CAMPOS CABRAL DE MENEZES

**FIBROCIMENTO PRODUZIDO COM POLPA KRAFT DE
PINUS TRATADA COM SULFATO DE ALUMÍNIO**

**LAVRAS – MG
2023**

RODRIGO CAMPOS CABRAL DE MENEZES

**FIBROCIMENTO PRODUZIDO COM POLPA KRAFT DE
PINUS TRATADA COM SULFATO DE ALUMÍNIO**

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

Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli
Orientador

M.Sc. Ianca Oliveira Borges
Co-orientadora

**LAVRAS – MG
2023**

RODRIGO CAMPOS CABRAL DE MENEZES

**FIBROCIMENTO PRODUZIDO COM POLPA KRAFT DE PINUS TRATADA
COM SULFATO DE ALUMÍNIO**

**FIBER CEMENT PRODUCED WITH PINE KRAFT PULP TREATED WITH
ALUMINUM SULFATE**

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

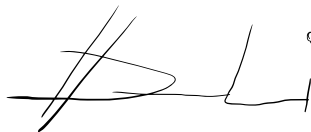
APROVADA em 15 de dezembro de 2023

Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli UFLA

M.Sc. Ianca Oliveira Borges UFLA

M.Sc. Lorrان de Sousa Arantes UFLA

M.Sc. Felipe Gomes Batista UFLA



Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli
Orientador

M.Sc. Ianca Oliveira Borges
Co-orientadora

LAVRAS – MG

2023

RESUMO

O fibrocimento com o uso de polpa celulósica Kraft já é utilizado no mercado de telhas e placas, porém a interação entre a matriz cimentícia, extremamente alcalina, e as fibras vegetais é um desafio. O presente trabalho abordou uma possível solução para este impasse, o pré-tratamento das fibras vegetais com sulfato de alumínio (SA) em água deionizada. O propósito da pesquisa foi verificar as propriedades físicas e mecânicas de compósitos cimentícios produzidos com polpa Kraft de *Pinus sp.*, não branqueada, após ser submetida ao tratamento com sulfato de alumínio (SA) em concentrações de 0%, 4% e 11%. Foi avaliado também estas mesmas propriedades após 200 ciclos de envelhecimento acelerado. Os resultados encontrados demonstraram que o acréscimo de SA levou a um aumento na absorção de água e porosidade, alcançando nos tratamentos com 11% de SA os valores de 37,9% e 61,9% respectivamente. Porém, após os 200 ciclos, apresentou uma absorção de água de apenas 14,2% e uma porosidade de 36,5% para o tratamento com 4% de SA. O módulo de ruptura (MOR) não mostrou variações significativas entre tratamentos, com valores próximos a 6,7 MPa e após os 200 ciclos, próximos a 4,3 MPa. Já o Limite de Proporcionalidade (LOP) apresentou variação significativa apenas com 11% de SA, (4,1 MPa), enquanto os outros tratamentos ficaram próximos a 5,5 MPa. Os resultados após os ciclos de envelhecimento acelerado levaram a uma redução gradativa à medida que se aumentava a quantidade de SA. Todavia o Módulo de Elasticidade (MOE) apresentou pequeno decréscimo com o aumento de SA para os corpos de prova ensaiados a 28 dias e equivalência de valores após os 200 ciclos. A Energia Específica (EE) foi o único parâmetro que apresentou melhora contínua com o aumento de SA. Novas pesquisas na área são necessárias, refinando os parâmetros e visando a melhor aplicação deste tratamento, uma vez que a integração entre as fibras e o cimento demonstra a possibilidade de um futuro mais sustentável para a construção civil.

Palavras-chave: Fibras vegetais. Propriedades físicas. Propriedades mecânicas. Compósitos cimentícios. Envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

Fiber cement with the use of Kraft cellulosic pulp is already used in the tile and board market, but the interaction between the cementitious matrix, which is extremely alkaline, and the vegetable fibers is a challenge. The present work addressed a possible solution to this impasse, the pretreatment of plant fibers with aluminum sulfate (SA) in deionized water. The purpose of this research was to verify the physical and mechanical properties of cementitious composites produced with unbleached *Pinus sp.* Kraft pulp after being treated with aluminum sulfate (SA) at concentrations of 0%, 4% and 11%. These same properties were also evaluated after 200 cycles of accelerated aging. The results showed that the addition of AS led to an increase in water absorption and porosity, reaching 37.9% and 61.9% respectively in treatments with 11% AS. However, after 200 cycles, it showed a water absorption of only 14.2% and a porosity of 36.5% for the treatment with 4% of AS. The modulus of rupture (MOR) did not show significant variations between treatments, with values close to 6.7 MPa and after 200 cycles, close to 4.3 MPa. On the other hand, the Proportionality Limit (LOP) showed a significant variation with only 11% of SA (4.1 MPa), while the other treatments were close to 5.5 MPa. The results after the accelerated aging cycles led to a gradual reduction as the amount of SA increased. However, the Modulus of Elasticity (EOM) showed a slight decrease with the increase of SA for the specimens tested at 28 days and equivalence of values after 200 cycles. Specific Energy (EE) was the only parameter that showed continuous improvement with the increase in SA. Further research in the area is needed, refining the parameters and aiming at the best application of this treatment, since the integration between the fibers and the cement demonstrates the possibility of a more sustainable future for civil construction.

Keywords: Vegetable fibers. Physical properties. Mechanical properties. Cementitious composites. Accelerated aging.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo Geral	8
2.2 Objetivo Específico	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 Histórico do fibrocimento	9
3.2 Processo <i>Hatschek</i>	10
3.3 Fibras vegetais	11
3.4 Cimento Portland em compósitos	13
3.5 Mineralização (SA)	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS	14
4.1 Obtenção da polpa celulósica	14
4.2 Mineralização das polpas	14
4.3 Produção dos compósitos	15
4.4 Caracterização física dos compósitos	16
4.5 Caracterização mecânica dos compósitos	17
4.6 Envelhecimento acelerado	18
4.7 Microestrutura dos compósitos cimentícios	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.1 Propriedades físicas	18
5.2 Propriedades mecânicas	20
5.3 Microestrutura dos compósitos cimentícios	22
6. CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIA	25

1. INTRODUÇÃO

As preocupações recentes relacionadas à sustentabilidade ambiental estão sendo relatadas ao longo dos anos nas mais diversas áreas. As ações antrópicas são a razão para isso, passando de uma teoria para uma explicação relacionada às várias mudanças rápidas e drásticas em nosso planeta. Na área da construção civil se torna cada vez mais evidente, uma vez que esse setor é responsável por uma grande parte das emissões de gás carbônico e da poluição por resíduos sólidos, além do consumo acelerado de recursos naturais não renováveis. A construção civil é o segmento que mais consome matéria-prima e recursos naturais no planeta, sendo o terceiro maior emissor de gases do efeito estufa (FITTIPALDI, 2008). Diante desse cenário, esse setor tem buscado medidas para reduzir suas emissões, tanto na geração de resíduos quanto na exploração de recursos, sem comprometer a qualidade de suas obras e edificações, adotando soluções mais econômicas e sustentáveis (SCHUH, 2017).

O comportamento dos produtos feitos de cimento, conhecidos pela boa resistência à compressão, revela-se frágil sob cargas de flexão, devido à redução da energia específica e ao colapso do material quando a resistência à flexão é extrapolada (HALVAEI *et al.*, 2014; ADEDIRAN *et al.*, 2021). Uma solução amplamente utilizada na indústria para fortalecer o material cimentício e mitigar o início e a propagação de trincas é a adição de fibras sintéticas ou naturais, onde o material fica conhecido como fibrocimento. Essa técnica aumenta a energia específica, reduzindo o estresse sobre a matriz e permitindo uma deterioração progressiva e não abrupta (AGOPYAN *et al.*, 2005; MELO FILHO *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2020).

As fibras vegetais, além de fortalecer o material, apresentam vantagens como absorção de energia antes da fratura, capacidade de continuar funcionando após a formação de trincas e alta resistência à fadiga (JAMSHIDI; RAMEZANIANPOUR, 2011; NASSAR *et al.*, 2022; BORGES, 2023). Devido à sua versatilidade, disponibilidade abundante e origem renovável, essas fibras são amplamente utilizadas na construção como uma alternativa viável em substituição às fibras de amianto (ARDANUY *et al.*, 2015; MA *et al.*, 2022), oferecendo um bom desempenho mecânico sob tensão de flexão (TIAN *et al.*, 2016). Historicamente, a indústria do fibrocimento tem utilizado as fibras de polpa *kraft* de pinus como reforço devido ao seu desempenho em elementos ondulados e capacidade de filtração na fabricação de compósitos (IKAI *et al.*, 2010).

A alta porosidade e o pH extremamente alcalino da matriz cimentícia são obstáculos a serem superados no processo de fabricação de compósitos, devido ao dano causado às polpas celulósicas, sua composição química e caráter higroscópico neste cenário (TIAN *et al.*, 2016; NASSAR *et al.*, 2022; AKINWANDE *et al.*, 2022; BORGES, 2023). Uma solução para superar esse desafio é o tratamento químico com sulfato de alumínio (SA), que modifica a superfície das fibras, diminuindo os poros e proporcionando proteção contra o ataque alcalino gerado pela matriz sobre as fibras (PANTAWEE *et al.*, 2017).

Visando melhorar o desempenho mecânico dos compósitos na interface fibra-matriz, é essencial uma boa adesão entre estas parcelas no compósito (FARUK *et al.*, 2012; AMARAL *et al.*, 2022). O processo com solução salina de SA, também conhecido como agente mineralizador, pode promover a redução da higroscopicidade e absorção de água dos compósitos (SUKARTANA *et al.*, 2000).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Em virtude do ataque alcalino que ocorre nas fibras vegetais em materiais cimentícios, buscou-se um pré-tratamento para mitigar este efeito, preservando as fibras e mantendo suas propriedades físicas e mecânicas.

Promovendo o uso de fibras nos setores da construção civil e desenvolvimento de materiais, impulsionando a economia nestes setores e incentivando o cultivo de espécies vegetais para usos distintos.

2.2 Objetivo Específico

O objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito do pré-tratamento com SA (4% e 11%) utilizando solução com água deionizada. Foram estudados os efeitos nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios, aos 28 dias de cura e após a técnica de envelhecimento acelerado (200 ciclos).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Histórico do fibrocimento

O termo "fibrocimento" descreve um produto de baixo custo feito principalmente de cimento Portland sem aditivos, contendo minerais e fibras. Comparado a materiais à base de cimento não reforçados com fibra, o fibrocimento apresenta maior resistência à tração, ductilidade e resistência à ruptura abrupta (HAMZEH *et al.*, 2013).

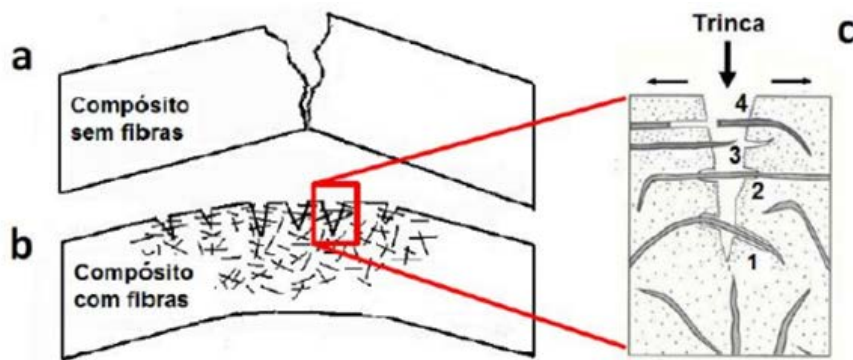
Anteriormente, o amianto era valorizado por suas várias vantagens, incluindo resistência à tração e altas temperaturas, baixa condutividade térmica, resistência a micro-organismos e produtos químicos, excelente isolamento elétrico e acústico, longa durabilidade, flexibilidade e facilidade de manipulação para tecelagem ou fiação. Sua interação com a água, bem como sua afinidade com o cimento, resinas e ligantes, tornavam o amianto extremamente atraente. Devido à sua abundância na natureza e à possibilidade de ser usado em grande escala, o amianto era considerado uma fibra mineral de alto potencial e valor agregado (URREA-CEFERINO *et al.*, 2019).

No entanto, a utilização do amianto ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$), também foi marcada pelo surgimento de relatos de doenças por parte de trabalhadores expostos à substância. A inalação do amianto causava sérios problemas respiratórios ao entrar em contato com os pulmões, o que ficou conhecido como doença do pulmão de pedra (ARDANUY *et al.*, 2015). Embora o uso do amianto como reforço fosse amplamente adotado devido a suas diversas características positivas, como o custo-benefício, durabilidade da fibra e resistência mecânica, química, física e intempérica (PAKRAVAN *et al.*, 2012; MA *et al.*, 2022), a pressão global durante a década de 1970 levou a questionamentos sobre a relação entre o uso do amianto e suas complicações para a saúde. Isso resultou na necessidade de pesquisas para encontrar fibras capazes de substituir o amianto e manter as propriedades do compósito.

Recentemente, os fabricantes brasileiros de telhas de fibrocimento têm demonstrado interesse em utilizar fibras vegetais como alternativa. Essas fibras, abundantes na natureza e na indústria, oferecem benefícios econômicos, sustentabilidade e não são tóxicas (FARUK *et al.*, 2012). A introdução de fibras de diferentes origens na matriz cimentícia traz melhorias significativas, tais como aumento da tenacidade, resistência à flexão, T0%SA da fissuração e redução na propagação de trincas, como ilustrado na Figura 1 (CORREIA *et al.*, 2018; MA *et al.*, 2022; AMARAL *et al.*, 2022). No entanto, é importante levar em consideração a degradação das fibras vegetais em

contato com os materiais cimentícios. Isso ocorre devido à alta alcalinidade da água presente nos poros da matriz cimentícia, o que pode resultar em fragilidade do compósito (TONOLI et al., 2016; BORGES, 2023).

Figura 1. Representação esquemática do comportamento à flexão de um compósito: a) compósito sem fibras, b) compósito com fibras e c) caminhamento da trinca através do compósito com fibras: [1] deslocamento, [2] interceptação, [3] arrancamento (*pull-out*) da fibra e [4] rompimento da fibra.

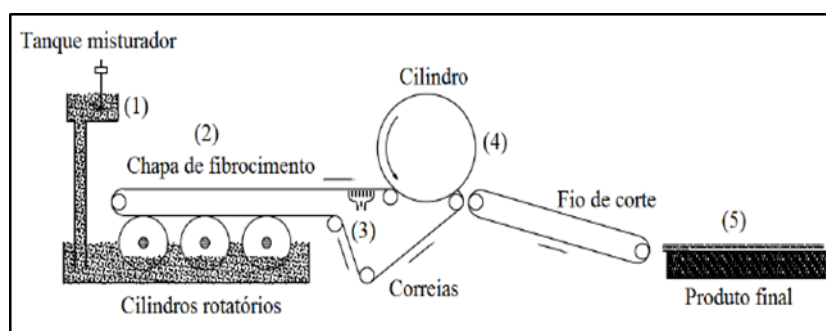


Fonte: TONOLI, 2009a.

3.2 Processo *Hatschek*

O método *Hatschek*, desenvolvido no final do século XIX e empregado na fabricação tanto de telhas quanto de papel ondulado (IKAI et al., 2010), está ilustrado na Figura 2 abaixo. Este método distintivo envolve a combinação de água, cimento, minerais e fibras em uma suspensão (1), a qual é introduzida em uma cuba equipada com cilindros revestidos por uma tela. As finas camadas formadas nesses cilindros são consolidadas em um feltro (2), percorrendo caixas vazias (3) para eliminar o excesso de água. Posteriormente, a camada compactada passa por um cilindro adicional (4), denominado prensa, para conferir uniformidade ao produto final (5). Este método desempenha um papel crucial na produção de telhas e papel ondulado de qualidade superior. (NEGRO *et al.*, 2005).

Figura 2. Esquema do processo Hatschek para a produção de telhas de fibrocimento.



Fonte: FARRAPO, 2015.

Mesmo sendo responsável por aproximadamente 85% das exportações globais de fibrocimento (TONOLI et al., 2009), processo *Hatschek* não é livre de desvantagens. Um destaque para a geração de uma significativa quantidade de água residual com elevado teor alcalino, tornando essencial a implementação de sistemas de filtragem e T0%SA de pH ao final do procedimento (IKAI et al., 2010; NASSAR et al., 2022).

3.3 Fibras vegetais

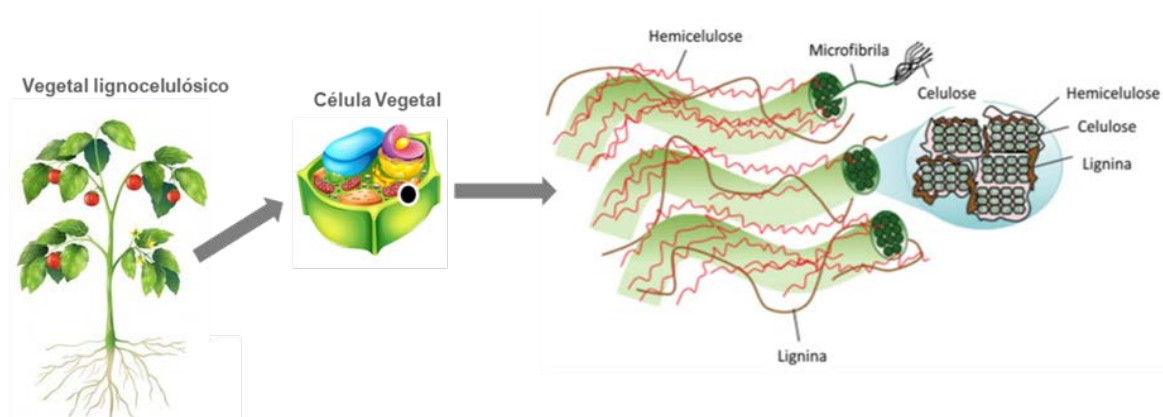
Fibras que atendam às tendências globais como viabilidade econômica, utilizações, custos e impacto ambiental são o foco para indústrias de fibrocimento, sejam isoladas ou somadas a outras fibras e materiais. As fibras vegetais são um exemplo desta possibilidade não apenas por seu caráter renovável, mas também pelos seus desempenhos mecânicos e térmicos (PEREIRA et al., 2015; PEREIRA et al., 2020). No Brasil em especial estas fontes são variadas e possuem particularidades que podem ser analisadas individualmente, tal como sua interação com a matriz cimentícia e seus comportamentos mecânicos. Porém, a mais utilizada mundialmente é a madeira, sendo fonte renovável, sustentável e difundida (BORGES, 2023).

Conforme destacado por Pason et al. (2006), as fibras vegetais são compostas principalmente por celulose, que varia de 40% a 60% em termos de teor, hemicelulose, que varia de 20% a 40%, e lignina, que varia de 10% a 25%. Essas proporções podem variar de acordo com a quantidade de componentes, fatores climáticos, propriedades do solo, particularidades de cada região e principalmente da espécie vegetal que se está analisando, influenciando na composição final do material produzido.

A estrutura das fibras vegetais é ilustrada na Figura 3 e é composta pelos seguintes elementos: I) Lamela média: uma camada fina localizada na parte externa da fibra,

responsável por unir e colar as células adjacentes, formando o tecido. II) Parede celular primária: formada por polissacarídeos, como hemiceluloses, e conjuntos desorganizados de fibrilas celulósicas. III) Parede celular secundária: subdividida em três partes, sendo a parede secundária externa (S1), parede secundária média (S2) e parede secundária interna (S3). Essa estrutura tem a função de conferir estabilidade mecânica à planta. É composta principalmente por microfibrilas, que são estruturas semi-cristalinas da célula vegetal organizadas em arranjos espirais.

Figura 3. Esquema da estrutura dos materiais lignocelulósicos.



Fonte: BORGES, 2023.

Essas características estruturais das fibras vegetais são fundamentais para compreender suas propriedades e seu desempenho em aplicações diversas (TONOLI *et al.*, 2009; THOMAS *et al.*, 2011; BORGES, 2023).

As fibras vegetais apresentam diversas vantagens, que incluem propriedades físicas e químicas favoráveis, baixas densidades, rigidez e dureza. Além disso, são amplamente disponíveis, de baixo custo e possuem características ambientais positivas, como biodegradabilidade e sustentabilidade, o que tem levado a utilização dessas fibras na produção de compósitos livres de amianto (FARUK *et al.*, 2012; ARDANUY *et al.*, 2015).

As fibras celulósicas, provenientes de polpas Kraft, são amplamente utilizadas na fabricação de fibrocimento pelo processo Hatschek, garantindo menor espessura das placas. Portanto, a aplicação de fibrocimento com fibras de polpa celulósica tornou-se comum, impulsionada pelo aprimoramento da matéria-prima, a otimização dos processos

produtivos com redução do consumo de energia e custos de investimento cada vez mais baixos (TONOLI *et al.*, 2009).

3.4 Cimento Portland em compósitos

Os compósitos à base de cimento Portland são os materiais de construção mais utilizados em todo o mundo, devido à disponibilidade de sua matéria-prima e ao excelente comportamento em termos de resistência à compressão. No entanto, esses materiais cimentícios são caracterizados por serem frágeis e possuem baixa resistência à tração (SOARES *et al.*, 2020). Diversas pesquisas estão sendo desenvolvida com o objetivo de aumentar a resistência à compressão e à tração em compósitos à base de cimento, visando à criação de novos materiais de cimento que reduzam fissuras, porosidade e previnam o surgimento de trincas.

3.5 Mineralização (SA)

Segundo Tonoli *et al.* (2010), estudos indicam que fibras de polpas celulósicas não branqueadas são mais adequadas para o desempenho de fibrocimentos em comparação com fibras branqueadas. No entanto, para evitar incompatibilidades entre as fibras com maior teor de lignina e a matriz cimentícia, podem ser realizados tratamentos superficiais nas fibras, visando melhorar sua durabilidade em meio alcalino.

O uso do sulfato de alumínio (SA) como tratamento químico das fibras vegetais tem o objetivo de protegê-las contra a ação do meio alcalino proporcionado pelo cimento. Esse tratamento promove a mineralização superficial das fibras, além de imobilizar a matéria orgânica e reduzir sua capacidade de absorção de água. Isso evita possíveis variações dimensionais, minimiza incompatibilidades químicas e reações de pega e endurecimento do cimento, e proporciona melhorias na durabilidade, resistência ao fogo e proteção contra microrganismos do compósito resultante (SARMIENTO E FREIRE, 1996; BORGES, 2023).

O sulfato de alumínio é um sal ácido que, em solução aquosa, hidrolisa em ácido sulfúrico e hidróxido de alumínio (HA). O hidróxido de alumínio forma partículas em suspensão na água, às quais as impurezas presentes no meio aderem. O sulfato de alumínio forma uma camada de sulfato e hidróxido de alumínio na superfície das fibras da polpa. Além disso, o sulfato de alumínio pode reagir com o óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio presentes nos materiais cimentícios, formando a etringita, um mineral

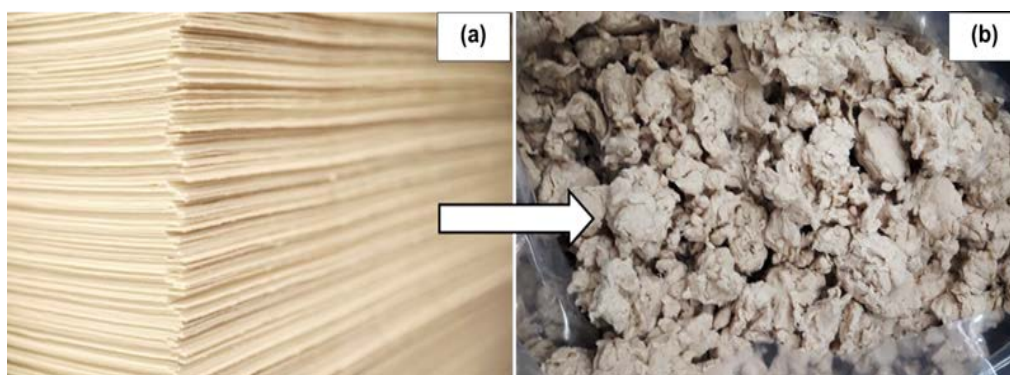
composto de sulfato de cálcio e alumínio hidratado. Isso pode diminuir a permeabilidade e aumentar a compactação do material. No entanto, é importante destacar que um excesso de etringita pode causar maior retração dos compósitos, placas ou telhas (HE *et al.*, 2019; BORGES, 2023).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Obtenção da polpa celulósica

As polpas celulósicas não branqueadas de Pinus, apresentadas na Figura 4, foram utilizadas nos experimentos após passarem pela fibrilação (refinamento de 35° SR, Grau Schopper Riegler).

Figura 4. Polpas celulósicas não-branqueadas (a) antes; (b) após o refinamento



Fonte: BORGES *et al.*, 2023.

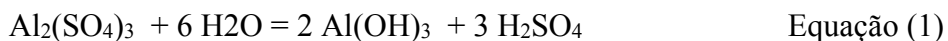
A fim de produzir a matriz cimentícia, foram utilizados o CPV-ARI Portland (ABNT - NB5733) e o calcário agrícola (filler carbonático). A fim de reduzir os custos de fabricação de cimento, o calcário foi utilizado como substituto parcial para o cimento Portland (Bezerra *et al.*, 2006). Este método é utilizado pelas indústrias do setor. O sulfato de alumínio utilizado ($Al_2(SO_4)_3$) possui um mínimo de 16% de teor de alumínio com coloração branca, em forma de pó, seguindo a metodologia de Borges (2023).

4.2 Mineralização das polpas

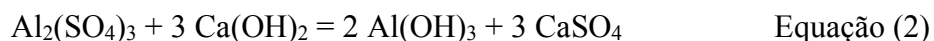
Para a preparação, inicialmente utilizou-se água deionizada (pH~7-8) e sulfato de alumínio (SA) nas concentrações 0% (T0%SA), 4% (T4%SA) e 11% (T11%SA). Em seguida, as polpas celulósicas de Pinus não branqueadas foram imersas nessa solução,

levadas para um agitador mecânico a 300 RPM durante 15 min e, em seguida, agitadas levemente durante um período de 24 h (BORGES, 2023).

O SA, sofre hidrólise em solução aquosa (Equação 1), resultando em ácido sulfúrico e hidróxido de alumínio (HA), uma substância responsável por aglutinar partículas suspensas em água e precipitá-las (CUNHA, 1946; BORGES, 2023).



De acordo com Borges (2023), o meio alcalino promove a formação de partículas em suspensão na água, às quais as impurezas encontradas nesse meio aderem ao hidróxido de alumínio. Pensando nisso, a autora utilizou em sua pesquisa a água de pH alcalino, com o intuito de favorecer a reação entre o ácido sulfúrico liberado, em uma dada zona de pH com alcalinidade, formando sulfato de cálcio e hidróxido de alumínio. Assim, como demonstrado na Equação 2. O sulfato de cálcio (CaSO_4) junto ao HA formam a etringita que mineraliza as fibras de celulose e ajudam no preenchimento de vazios.



4.3 Produção dos compósitos

As variáveis e níveis a serem avaliados resultaram em 3 tratamentos com a mesma concentração de polpa não branqueada de Pinus (PKP) (10%), no conteúdo de sulfato de alumínio (SA) com tratamento químico (4,0% e 11%) e emprego de água deionizada no pré-tratamento das fibras (N). A relação de tratamentos e as respectivas formulações que foram testados estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1. Formulação dos compósitos/placas de fibrocimento.

Tratamento	Cimento (%)	Calcário (%)	Polpa não branqueada (%)	Sulfato de alumínio (%)
T0%SA	77,2	12,8	10	-
T4%SA	77,2	12,8	10	4
T11%SA	77,2	12,8	10	11

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Os fibrocimentos, em diferentes condições, foram moldados em escala laboratorial usando a técnica adaptada de drenagem a vácuo da mistura e posterior prensagem manual e mecânica (simulação do processo *Hatschek*), conforme Eusebio *et al.* (1998); Savastano Junior *et al.* (2000); Tonoli (2009) e Borges (2023).

A fim de preparar os compósitos, realizou-se uma mistura de cimento, calcário, água e polpa celulósica (pré-tratada e sem tratamento), sendo agitados a 300 rpm por 15 minutos. A mistura preparada é então transferida para um molde sob aplicação de vácuo, onde a mistura após a retirada do excesso de água é densificada manualmente até que uma superfície sólida, plana e seca seja obtida. Em seguida, as placas foram prensadas em uma prensa mecânica a uma taxa de 10 toneladas por cinco minutos, conforme descrito na metodologia de Borges (2023). Após este processo, as placas foram cortadas em corpos de provas com 4 cm de largura e 18 de comprimento, rendendo 4 corpos de prova por compósito criado. A Figura 5 abaixo mostra os corpos de prova produzidos, que em seguida foram submetidas aos ensaios físicos e mecânicos.

Figura 5. Corpos de prova de fibrocimento produzidos.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

4.4 Caracterização física dos compósitos

A absorção de água (AA) e a porosidade aparente (PA) foram determinadas conforme a ASTM C 948 81 (American Society for Testing and Materials), com mediana de quatro amostras de teste para cada fórmula e caracterização física após 28 dias de cura. Foram também realizados ensaios físicos nas amostras submetidas aos 200 ciclos de envelhecimento acelerado.

A equação 3 mostra o cálculo da porosidade aparente (PA) ou índice vazio. A taxa de absorção relativa (AA), em porcentagem, quando os constituintes são imersos em água, é descrita na Equação 4.

$$PA = \frac{M_{sss} - M_{seca}}{M_{sss} - M_i} \times 100$$

(Equação 3)

$$AA = \frac{M_{sss} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100$$

(Equação 4)

Onde M_{sss} caracteriza a massa do compósito saturado em água e superfície seca, M_{seca} é a massa do compósito seco em estufa ventilada a 90°C por 24 h e M_i indica a massa do compósito saturado imerso em água.

4.5 Caracterização mecânica dos compósitos

Seguindo o *Reunion Internationale des Laboratoires d'essais et des Recherches sur les Matériaux et les Constructions - RILEM* (1984) para ensaios a flexão, em que a configuração adotada segue quatro pontos de distanciamento entre apoios inferiores igual a 135 mm e superiores igual a 45 mm, com taxa de deflexão de 1,5 mm/min, sendo determinado os valores de tensão no limite de proporcionalidade (LOP), módulo de ruptura (MOR), módulo elástico (MOE) e tenacidade do material (TE). As fórmulas para o cálculo de LOP, MOR e MOE estão apresentadas nas Equações 5 a 7:

$$LOP = \frac{P_{lop} \cdot L_v}{b \cdot h^2}$$

(Equação 5)

$$MOR = \frac{P_{max} \cdot L_v}{b \cdot h^2}$$

(Equação 6)

$$MOE = \frac{276 \cdot L_v^3}{1296 \cdot b \cdot h^3} \cdot (m)$$

(Equação 7)

Onde P_{lop} é a força no maior ponto da parte linear da curva força vs deflexão, P_{max} é a força máxima, L_v é a medida do maior vão de ensaio (135 mm), b e h são a largura e

espessura dos compósitos respectivamente, m é a tangente do ângulo de inclinação da curva força vs deflexão durante a deformação elástica.

A Energia Específica (EE) ou tenacidade, como mostra a Equação 8, é calculada através da absorção da energia pela integral da área sob a curva multiplicada a deformação específica, até o ponto correspondente a 30% da carga máxima atingida, que diz respeito à tensão de $0,3 \cdot \text{MOR}$. Os valores de tensão (δ) são calculados com a Equação 5 para cada valor de carga, P . Os valores de deformação foram divididos pela medida do vão (135 mm), sendo assim chamada de deformação específica (Tonoli, 2009).

$$EE = \frac{\text{Energia absorvida}}{b \times h} \quad (\text{Equação 8})$$

4.6 Envelhecimento acelerado

A prática adotada foi adaptada da norma EN 494 (*European Standard*, 1994) e consistiu em ciclos de imersão e secagem, onde os corpos de prova foram submetidos a 200 ciclos e são imersos completamente em água por 170 min, para preencher os poros. Posteriormente, os compostos permaneceram inertes por um intervalo de 10 min e em seguida, passam pela secagem dos poros, que dura 170 min até a temperatura de 70°C. Após os corpos de provas serem submetidos a esse processo são verificados suas propriedades físicas e mecânicas.

4.7 Microestrutura dos compósitos cimentícios

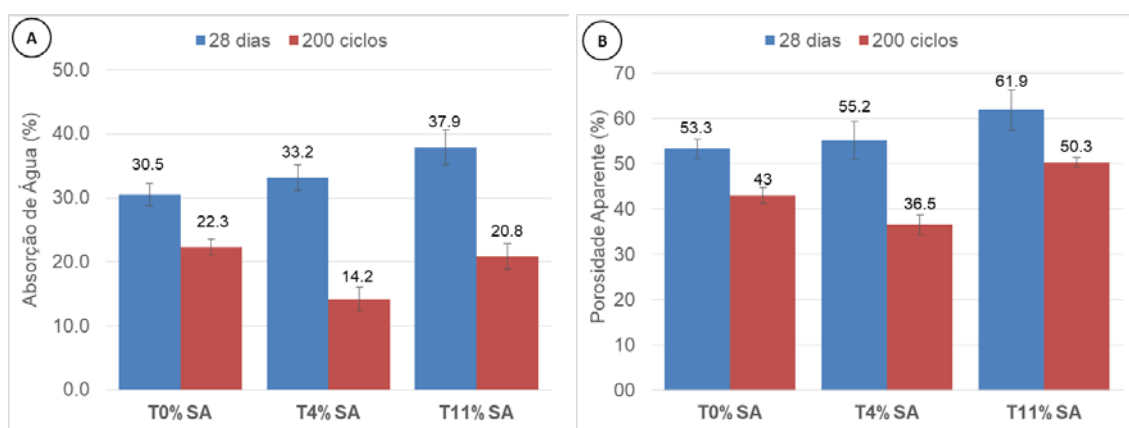
As fraturas dos compósitos com fibras modificadas foram visualizadas em microscópio óptico modelo com ampliação de até 100x.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades físicas

A Figura 6 apresenta os dados relativos aos tratamentos realizados para as propriedades físicas, absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) dos compósitos de fibrocimento.

Figura 6. Valores médios e desvio padrão das propriedades físicas (a) absorção de água (AA); e (b) porosidade aparente (PA) para compósitos cimentícios testados no 28º dia de cura e 200 ciclos de envelhecimento.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

É possível observar que os compósitos tratados previamente com água deionizada, à medida que a concentração de SA aumenta é progredida, as propriedades de absorção de água e porosidade aumentam. Para as concentrações de 0%, 4% e 11%, foram encontrados os valores de 30,5%, 33,2% e 37,9% para absorção de água, além de 53,3%, 55,2% e 61,9% de porosidade aparente, respectivamente para ambos os parâmetros. Indicando na água deionizada a tendência de baixa precipitação de hidróxido de sódio e produtos oriundos da hidratação do cálcio, ocorrendo apenas superficialmente na fibra. De acordo com Borges (2023), o fato deste fenômeno não ocorrer com intensidade no interior da fibra, faz com que a etringita formada com o acúmulo de SA deposite-se apenas no exterior da fibra. Com baixo preenchimento dos poros, a presença de sítios de água se mostra superior em questões de tamanho e número, aumentando tanto porosidade quanto absorção de água.

Após o processo de envelhecimento acelerado, observou-se uma diminuição significativa nos valores de absorção de água e porosidade aparente nos compósitos com polpas tratadas. Neste cenário a absorção de água para os tratamentos T0%SA, T4%SA e T11%SA foram respectivamente de 22,3%, 14,2% e 20,8%, consoante a este parâmetro, a porosidade aparente apresentou os valores de 43%, 36,5% e 50,3% respectivamente. De acordo com Borges (2023), essa redução pode ser atribuída ao preenchimento dos poros da matriz devido à continuidade do processo de hidratação do cimento durante os 200 ciclos, bem como à reprecipitação de cálcio nos poros da matriz. Esses efeitos resultam

na diminuição do tamanho dos poros e no aumento do volume de sólidos, o que impede a entrada de água. Estudos anteriores sobre o envelhecimento acelerado em compósitos, conduzidos por Correia et al. (2018) e Ballesteros et al. (2019), também relataram uma redução na absorção de água e porosidade aparente, que se correlacionou com um maior número de ciclos aplicados.

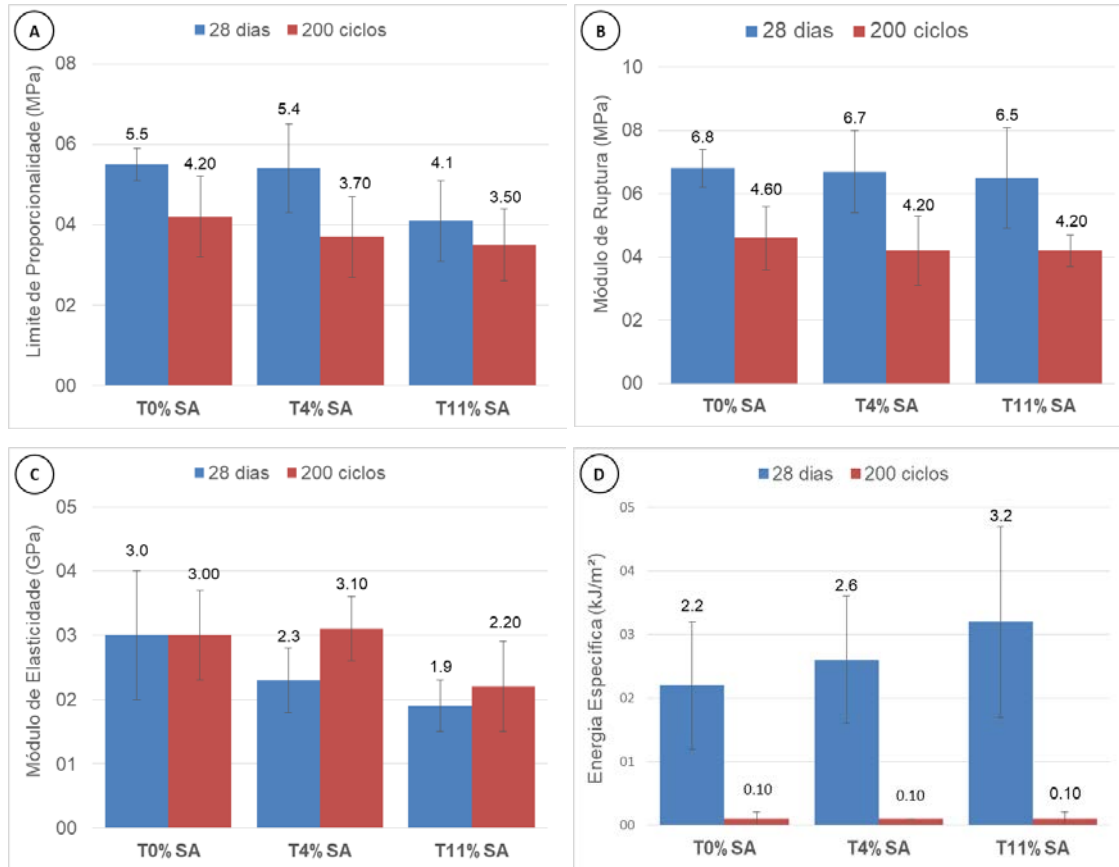
O envelhecimento acelerado mostrou que a água presente nestes compósitos continuou contribuindo para a hidratação do cimento. E, uma vez que a água presente na matriz cimentícia encontrava-se em uma quantidade elevada, houve a formação mais intensa de produtos da hidratação do cimento, encontrando assim valores inferiores de absorção de água e porosidade para 0 e 4% de SA. Para o caso de 11% de SA, a quantidade superior de sulfato de alumínio levou a um selamento mais efetivo de alguns vazios, levando ao isolamento dos mesmos na matriz cimentícia. Logo, após os 200 ciclos, muitos destes vazios não foram preenchidos com produtos da hidratação concomitantemente ao fato de não poderem ser ocupados por água.

A NBR 7.581-1 (ABNT, 2014) define a classificação e os requisitos para telhas corrugadas de fibrocimento. Os tratamentos T0%SA e T4%SA estão dentro dos parâmetros requeridos, com teor de absorção de água igual ou inferior a 37% considerando o desvio padrão, com exceção da formulação T11%SA.

5.2 Propriedades mecânicas

Os resultados mecânicos, apresentados na Figura 7a, apontam decréscimo no limite de proporcionalidade (LOP) para o tratamento com 11% de SA, apresentando 4,1MPa, enquanto o tratamento com 0% e 4% de SA ficaram próximos, com 5,5MPa e 5,4MPa respectivamente. Isso pode ser justificado pela precipitação dos produtos de hidratação com maiores quantidades de SA, favorecendo o surgimento de fissuras e zonas de baixa resistência mecânica no compósito. Esta queda do LOP demonstra uma menor capacidade do material de manter um comportamento elástico linear antes de entrar na fase plástica. Os resultados após os 200 ciclos de envelhecimento acelerado indicam que a o acréscimo de sulfato de alumínio implica em uma redução mais acentuada no LOP, onde os valores encontrados para os tratamentos T0%SA, T4%SA e T11%SA foram de 4,2 MPa, 3,7 MPa e 3,5 MPa, respectivamente.

Figura 7. Valores de média e desvio padrão das propriedades mecânicas (a) limite de proporcionalidade (LOP); (b) módulo de ruptura (MOR); (c) módulo de elasticidade (MOE) e (d) energia específica (EE) para compósitos cimentícios testados no 28º dia de cura e 200 ciclos de envelhecimento.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Os compósitos T0%SA, T4%SA e T11%SA apresentaram valores de módulo de ruptura (MOR) muito semelhantes entre si (Figura 7b) de 6,8 MPa, 6,7 MPa e 6,5 MPa respectivamente. Esse parâmetro é diretamente relacionado à resistência mecânica do compósito cimentício e aos mecanismos energéticos específicos que ocorrem entre as fibras e o cimento, indicando a contribuição conjunta da matriz e do reforço (BORGES, 2023). Porém devido à deficiência no preenchimento dos vazios no compósito nos tratamentos realizados, corrobora para a conclusão que neste parâmetro os tratamentos não foram satisfatórios. Esse comportamento se manteve ao final dos 200 ciclos de envelhecimento acelerado, apresentando os valores e 4,6 MPa para T0%SA e 4,2 MPa para ambos T4%SA e T11%SA.

Comparando compósitos tratados com água deionizada aos tratados com água alcalina (BORGES, 2023), estes apresentam uma maior densificação em relação aos primeiros, mantendo mais de suas características mecânicas. Esse fato contribuiu para uma equivalência no módulo de elasticidade (MOE) entre ambos os grupos de 28 dias e após 200 ciclos como sugerido pela Figura 7c. Os valores encontrados para este parâmetro foram de 3,0 GPa, 2,3 GPa e 1,9 GPa para aqueles ensaiados a 28 dias, 3,0 GPa, 3,1 GPa e 2,2 GPa. Para a propriedade de MOE neste caso, observa-se que os ciclos de envelhecimento levaram a uma melhora no parâmetro, podendo sugerir que as propriedades das fibras se mantiveram mais estáveis com o tempo.

Analisando os dados de energia específica (EE), demonstrados na Figura 7d, os compósitos apresentaram melhora nessa propriedade, com o acréscimo de SA, partindo de 2,2 kJ/m² com 0% de SA e chegando a 2,6 kJ/m² com 4% e maximizando até 3,2 kJ/m² com 11% de SA. Fato que se relaciona com a mineralização superficial dos compósitos, que em um primeiro momento leva a uma proteção do interior das fibras contra este fenômeno. Com isto, as propriedades das fibras em quanto a seu desempenho mecânico são mantidas por mais tempo, tal qual o caso da EE. Após o envelhecimento, como previamente mencionado, existe uma penetração maior devido a contínua hidratação do cimento, levando a uma perda significativa de EE, para 0,1 kJ/m² para os três tratamentos.

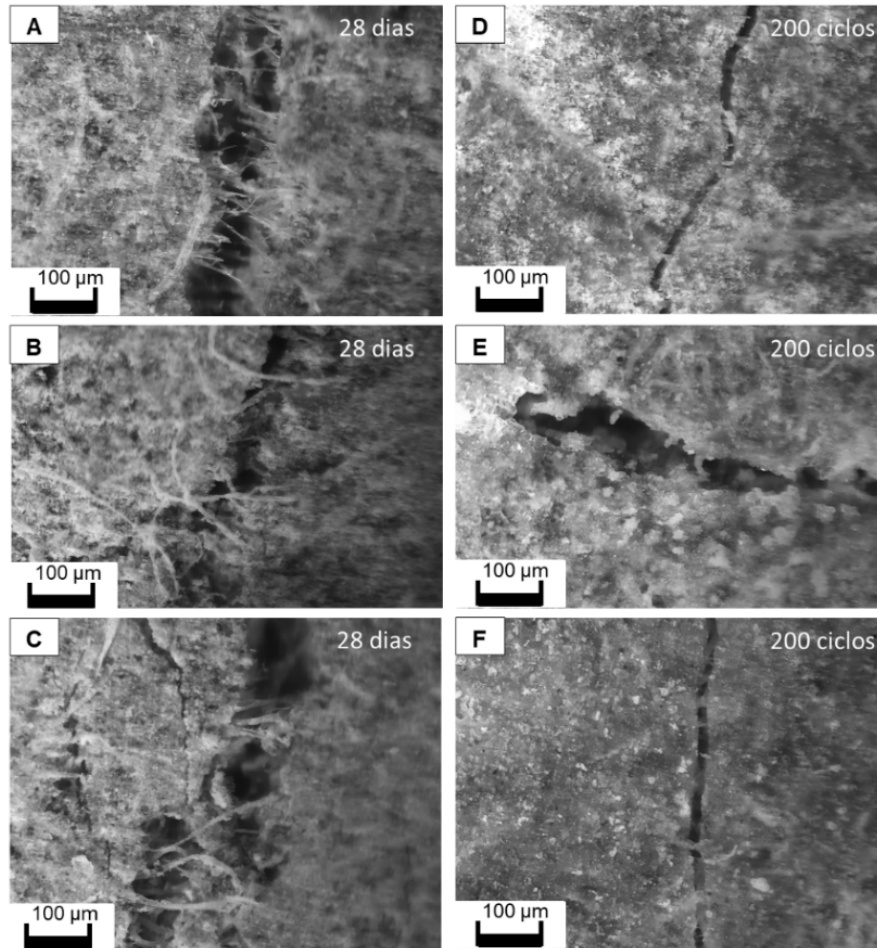
Vale ressaltar que todos os tratamentos T0%SA, T4%SA e T11%SA se encaixam na categoria 2, atendendo à norma técnica NBR 15498 (ABNT, 2007). Onde no 28º dia de cura para placas planas de cimento isentas de amianto, determina que os valores de MOR em flexão para chapas testadas em estado saturado, ou seja, 4-7 MPa para a categoria II, 7-13 MPa para a categoria III e >13 MPa para a categoria IV.

5.3 Microestrutura dos compósitos cimentícios

Como apresentado pela Figura 8, as imagens dos tratamentos em questão apresentam um mesmo comportamento, onde a fratura se inicia pela fibra, não pela matriz cimentícia. As Figuras 8a, 8c e 8e correspondem aos tratamentos T0%SA, T4%SA e T11%SA respectivamente, ensaiados a 28 dias, apresentam a primeira evidência deste fenômeno, onde podemos ver que as fibras estão em grande maioria rompidas, demonstrando sua fragilidade. Isso relaciona com os dados provenientes dos ensaios mecânicos, em particular com os resultados de MOR, que demonstraram pequena piora.

Resultados semelhantes foram encontrados por Borges (2023), salientando que existe uma dificuldade de uma integração efetiva entre fibra e matriz cimentícia.

Figura 8. Microscopia óptica dos compósitos cimentícios com aumento de 100x. (a) T0%SA ensaiado a 28 dias; (b) T0%SA ensaiado após 200 ciclos; (c) T4%SA ensaiado a 28 dias; (d) T4%SA ensaiado após 200 ciclos; (e) T11%SA ensaiado a 28 dias; (f) T11%SA ensaiado após 200 ciclos.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As imagens correspondentes aos ensaios após 200 ciclos de envelhecimentos são apresentadas pelas Figuras 8b, 8d e 8f, para os tratamentos T0%SA, T4%SA e T11%SA respectivamente. Estas imagens corroboram para estas conclusões, uma vez que a presença das fibras íntegras se mostra escarça, podendo visualizar mais claramente apenas a estrutura da matriz cimentícia. Observando os resultados de MOR para este caso, podemos verificar que o pré-tratamento levou à uma piora, devido a perda de adesão das fibras com a matriz ou possível degradação das mesmas devido ao meio alcalino do

cimento, potencializado pelos ciclos de envelhecimento acelerado. Tal fato, também observado por Borges (2023), indica que apenas a componente cimentícia oferecia resistência ao compósito após o ciclo de envelhecimento.

6. CONCLUSÕES

O tratamento com água deionizada e sulfato de alumínio (SA) retardou a mineralização, prejudicando as propriedades físicas dos fibrocimentos, favorecendo em um primeiro momento o surgimento de vazios na matriz. Isto pode ser observado comparando os tratamentos 0% e 11% de sulfato de alumínio, onde o primeiro apresentou 30% de absorção de água e 53,3% de porosidade, frente a 37,9% de absorção de água e 61,9% de porosidade para o T11%SA. Após os 200 ciclos de envelhecimento foram observados a ininterrupção da hidratação da matriz cimentícia, evidenciada pela diminuição dos valores encontrados para os resultados dos ensaios físicos. Isto fez com que os vazios da matriz fossem mais preenchidos a cada ciclo de envelhecimento, com a contínua deposição de produtos da hidratação do cimento, incluindo regiões mais internas as fibras vegetais. A absorção de água e porosidade aparente para o tratamento T0%SA caíram para 22% e 43% respectivamente, comportamento também observado no tratamento T11%SA, apresentando valores de 20,75% e 50,3% respectivamente.

O desempenho mecânico geral dos compósitos foi prejudicado com o envelhecimento. Assim como não apresentou um resultado ao 28º dia de cura atrativo, seu desempenho continuou a se deteriorar com os ciclos de envelhecimento, evidenciando um processo de interação entre fibra e matriz cimentícia ineficiente.

Vale ressaltar que mesmo inferiores, os resultados utilizando água deionizada como tratamentos das fibras estão inseridos em valores normativos em termos de propriedades mecânicas segundo os parâmetros da NBR 15498 (ABNT, 2007). Porém devido a seus resultados inferiores foram classificadas como categoria 2, contemplando aplicações limitadas. Novos estudos devem ser realizados para melhor analisar os resultados obtidos, assim como inserir novos parâmetros de comparação com produtos já utilizados no mercado de fibrocimento como um todo.

REFERÊNCIA

ADEDIRAN, A. A.; AKINWANDE, A. A.; BALOGUN, O. A.; ADESINA, O. S.; ALIYU, S. J.; ERINLE, T. J.; NYIKA, J.; OLAYANJU, A. Selected properties of waste wig, egg shell and waste paper hybrid composites as potencial material for wall patitioning. **Materials Today: Proceedings**. 2020.

AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fibre-cement based materials in Sao Paulo, Brazil: an overview. **Cement & Concrete Composites**, Kidlington, v. 27, n. 5, p. 527-536, May. 2005.

AKINWANDE, A. A.; BALOGUN, O. A.; ROMANOVSKI, V.; DANSO, H.; KAMAROU, M.; ADEMATI, A. O. Mechanical performance and Taguchi optimization of kenaf fiber/cement-paperboard composite for interior application. **Environmental Science and Pollution Research** 29:52675–52688, 2022.

ALBINANTE, S. R.; PACHECO, É. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Química Nova**, v. 36, n. 1, p. 114-122, 2013.

AMARAL, L. M.; RODRIGUES, C. S.; POGGIALI, F. S. J. Hornification on vegetable fibers to improve fiber-cement composites: A critical review. **Journal of Building Engineering** 8, 2022.

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, 1981.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.498**: Placa de fibrocimento sem amianto — Requisitos e métodos de ensaio. 27p, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7581-1**: Telha de fibrocimento – Parte 1: Classificação e requisitos. 21p, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISSO 287:2012**: Papel e cartão - Determinação do teor de umidade de um lote - Método por secagem em estufa (ISO 287:2009, IDT). 12p, 2012.

BALLESTEROS, J. E. M.; MÁRMOL, G.; FILOMENO, R.; RODIER, L.; SAVASTANO JR., H.; FIORELLI, J. Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. **Construction and Building Materials** 205, 52–60, 2019. 55

BEZERRA, E. M.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO JUNIOR, H.; JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. The effect of different mineral additions and synthetic fiber contents on properties of cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 555-563, 2006.

BOLTRYK, M., PAWLUCZUK, E. Properties of a lightweight cement composite with an ecological organic filler. **Construction and Building Materials**. 51, 97–105. 2013.

BORGES, I. O. **Chemical modification of pinus Kraft pulp with aluminum sulfate for fiber-cement**. 58 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

BORGES, I. O. et al. Efeito do branqueamento das polpas celulósicas aplicadas em matrizes cimentícias. Anais do 55º Congresso Internacional de Celulose e Papel. ABTCP, São Paulo, 2023.

BUSTANAFRUZA, F.; JAFAR-TAFRESHI, M.; FAZLI, M. Studies on Thermal Decomposition of Aluminium Sulfate to Produce Alumina Nano Structure. **Journal Nanostructures**, p. 463- 468, 2013.

CHEN, C.; SUN, Z. Influence of Aluminum Sulfate on Hydration and Properties of Cement Pastes. **Journal of Advanced Concrete Technology** Vol. 16, 522-530. 2018.

COOK, J. T.; SCHOGGEN, H. L.; BELL, R. I.; SMITH, D. J.; MORTON, G. H. **Cementitious material reinforced with chemically treated cellulose fiber**. United States Patent. Patent No.: US 6,942,726 B2, p. 35. Assignee: BKI Holding Corporation, Wilmington, DE (US). Date of Patent: Sep. 13, 2005.

CORREIA, V. C.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V. M. Utilization of vegetable fibers for production of reinforced cementitious materials, **RILEM Technical Letters** 2, 145–154, 2018.

CUNHA, A. Determinação do pH ótimo de floculação e dosagem mínima de coagulantes. **Revista DAE**. Edição nº 17. 1946.

EUROPEAN STANDARD. **EN 494**: fibre-cement profiled sheets and fittings for roofing – products specification and test methods. London: British Standards Institution, 1994.

EUSEBIO, D. A.; CABANGON, R. J.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. The Manufacture of Wood Fibre Reinforced Cement Composites from Eucalyptus pellita and Acacia mangium Chemithermomechanical Pulp. In: PACIFIC RIM BIO-BASED COMPOSITES SYMPOSIUM 4. Philippines. **Proceedings...** Philippines: Bogor Agricultural University, p. 428-436. 1998.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010, **Progress in Polymer Science** 37, 1552–1596. 2012.

FISCHER, H. **Method of producing formed articles of a fiber reinforced, hydraulically setting material**. United States Patent. Patent Number: 5,795,515, p. 3. Assignee: Nueva AG, Weesen, Switzerland. Date of Patent: Aug. 18, 1998.

FITTIPALDI, Mônica. **Habitação Social e Arquitetura Sustentável em Ilhéus/BA**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2008.

HAMZEH, Y.; ZIABARI, K. P.; TORKAMAN, J.; ASHORI, A.; JAFARI, M. Study on the effects of white rice husk ash and fibrous materials additions on some properties of fiber–cement composites. **Journal of Environmental Management**. Volume 117, Pages 263-267, 2013.

HALVAEI, M.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M. Application of low modulus polymeric fibers in engineered cementitious composites, **Journal of Industrial Textiles** 43 (4):511-524, 2014.

HAN, J.; WANG, K.; WANG, Y.; SHI, J. Study of aluminum sulfate and anhydrite on cement hydration process. **Materials and Structures**. 49, 1105–1114. 2016.

HE, H.; WANG, Y.; WANG, J. Effects of Aggregate Micro Fines (AMF), Aluminum Sulfate and Polypropylene Fiber (PPF) on Properties of Machine-Made Sand Concrete. **Applied Sciences**, 9, 2250. 2019.

IKAI, S.; ZAMPIERI, V.; RODRIGUES, A. V. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 24, n. 2, p. 171-180. 2010.

JAMSHIDI, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A. Laboratory and industrial investigations on hybrid of acrylic and glass short fibers as an alternative for substituting asbestos in Hatschek process. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 25, p. 298-302, Jan. 2011.

JOHN, V. M.; BETIOLI, A. M. Estudo de mecanismos de floculação em fibrocimento produzido por processo Hatschek. Pós-Doutorado. Escola Politécnica (EP). Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, SP, Brasil. 2008.

KAI, S.; L. TAO, L. LI, Z. LIU. Research on the low-alkali accelerating admixture for shotcrete. **Concrete**. P. 59-62. 2005.

KAN, C.; LAN, M.; KONG, L.; YANG, J. Effect of Aluminium Sulfate on Cement Properties. **Materials Science Forum** Vols 743-744 (2013) pp 285-291. 2013.

KAWAY, S.; LING, F.; YAMAUCHI, H.; PULIDO, O. R.; TAMURA, Y.; SASAKI, H. Manufacture of cement-bonded boards from wood and other lignocellulosic materials: relationship between cement hydration and mechanical properties of cement-bonded boards. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000. **Anais do Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region**. Australia, p. 13-23. 2000.

LV, P.; ALMEIDA, G.; PERRÉ, P. TGA-FTIR analysis of torrefaction of lignocellulosic componentes (cellulose, xylan, lignin) in isothermal conditions over a wide range of time durations. **Bioresources**, v. 10, n. 3, p. 4239-4251, 2015.

MA, C.; FAN, F.; CHEN, M.; LI, S.; CHEN, YI.; PAN, Z.; LIU, R. Preparation of a novel superabsorbent fiber–cement composite and evaluation of its self-healing performance. *Cement and Concrete Composites* 133, 2022.

MA, Z.; CHEN, D.; GU, J.; BAO, B.; ZHANG, Q. Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA–FTIR and model-free integral methods. *Energy Conversion and Management*, v. 89, p. 251-259, 2015.

MELO FILHO, J. D. A.; SILVA, F. D. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cement and Concrete Composites* 40, 30–39. 2013.

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of Kraft pulp fiber–cement composites. *Cement and Concrete Research*. Volume 37, Issue 11, Pages 1531-1543. 2007.

NASSAR, R. U. D.; SOROUSHIAN, P.; BALACHANDRA, A.; NASSAR, S.; WEERASIRI, R.; DARSANASIRI, N.; ABDOL, N. Effect of fiber type and content on the performance of extruded wood fiber cement products. *Case Studies in Construction Materials* 16, 2022.

PAGLIA, C.; WOMBACHER, F.; BOHNI, H. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems: I. Characterization of the setting behavior. *Cement and Concrete Research*, v. 31, Issue 6, Pages 913-918. 2001.

PAKRAVAN, H.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M. Investigation on polymeric fibers as reinforcement in cementitious composites: Flexural performance. *Journal of industrial textiles*, v. 42, n. 1, p. 3-18, 2012.

PANTAWEE, S.; SINSIRI, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate [Al₂(SO₄)₃] and hydrated lime [Ca(OH)₂] treatment. *Construction and Building Materials* 156, 435-442, 2017.

PASON, P.; KYU, K. L.; RATANAKHANOKCHAI, K. Paenibacillus curdlanolyticus strain B-6 xylanolytic-cellulolytic enzyme system that degrades insoluble polysaccharides. *Applied and Environmental Microbiology*, Washington, v. 72, n. 4, p. 2483-2490, 2006.

PEREIRA, T. G. T.; SILVA, D. W.; EUGÊNIO, T. M. C.; SCATOLINO, M. V.; TERRA, I. C. C.; FONSECA, C. S.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. *Materials Today: Proceedings* 31, 2020.

PIRES, F. S.; KUAN, G. S. S.; BENAZZI, R. C.; BUGAJER, S. **Preparação de Massa, Refinação**. In: PHILIP, P. & D'ALMEIDA, M.L.O. Tecnologia de Fabricação de Celulose e Papel. Volume II. 2 ed, São Paulo. Publicação IPT, p.588-614, 1988.

REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DES RECHESCHES SUR LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCTIONS. RILEM 49TFR: testing methods for fibre reinforced cement-based composites. *Matériaux et Constructions*, Paris, v. 17, n. 102, p. 441-456, 1984.

SALLES, T. T.; SILVA, M. L.; SOARES, N. S.; MORAES, A. C. Exportação brasileira de papel e celulose: sua dinâmica pela equação gravitacional. **Revista Árvore**. 35 (3): 573-580. 2011.

SAVASTANO JUNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 379-384. 2000.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD. **SCAN-C 62:00**. Chemical pulp. Water Retention Value. Stockholm, Sweden, p. 5. 2000.

SCHUH, Patrick Diogo Mariano. **O uso do EPS na construção civil: Estudo comparativo entre concreto leve com EPS e o concreto convencional**. 2017. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa, 2017.

SILVA, A. C.; SAVASTANO JUNIOR, H.; JOHN, V. M. Envelhecimento de compósitos à base de escória de alto-forno reforçados com polpa celulósica residual de eucalipto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 25-44, jan./mar. 2009.

SILVA, L. M. S.; MAGALHÃES, R. S.; MACEDO, W. C.; SANTOS, G. T. A. *et al.* Utilization of discarded foundry sand (DFS) and inorganic waste from cellulose and paper industry for the manufacture of glass-ceramic materials. **Cerâmica**. P. 413-420. 2020.

SUKARTANA, P.; RUSHELIA, R.; SULASTININGSIH, I. M. Resistance of Wood- and Bamboo-Cement Boards to subterranean termite *Coptotermes gestroi* Wasmann (Isoptera: Rhinotermitidae). In: **WOOD- CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION. Anais do Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region**. Australia, 2000. p. 62-65. 2000.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi Useful method T 248 sp-00**: Laboratory Beating of Pulp (PFI Mill Method). Atlanta, GA, USA, 2000.

THOMAS, S.; PAUL, S. A.; POTHAN, L. A.; DEEPA, B. Natural fibres: structure, properties and applications. **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

TIAN, H.; ZHANG, Y. X.; YANG, C.; DING, Y. Recent advances in experimental study on mechanical behaviour of natural fibre reinforced cementitious composites, **Structural Concrete** 17, 564–575, 2016.

TONOLI, G. H. D. **Fibras curtas de Eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento**. Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo – Campus São Carlos, p. 150. 2009.

TONOLI, G. H. D.; FUENTE, E.; MONTE, C.; SAVASTANO JR., H.; ROCCO LAHR, F.A.; BLANCO, A. Effect of fibre morphology on flocculation of fibre–cement suspensions. **Cement and Concrete Research**. Volume 39, Issue 11, Pages 1017-1022. 2009.

TONOLI, G. H. D.; RODRIGUES FILHO, U. P.; SAVASTANO JUNIOR, H.; BRAS, J.; BELGACEM, M. N.; ROCCO LAHR, F. A. Cellulose modified fibres in cement based composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. Volume 40, Issue 12, Pages 2046-2053, 2009.

URREA-CEFERINO, G. E.; PANESAR, D. K.; SAVASTANO JUNIOR, H. Adjusting curing parameters for innovative and durable vegetable fibre-cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, n. 97, p. 121–133, 2019.

XUE, J. G. On the expansion associated with ettringite formation. **J. Chinese Ceramic Society**. 12. 252-257. 1984.

YANG, F.; ZHANG, Y.; FENG, Y. Adding Aluminum Hydroxide to Plant Fibers Using In Situ Precipitation to Improve Heat Resistance. **BioResources** 12(1), 1826-1834. 2017.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, n. 86, p. 1781-1788, 2007.

YANG, N. R.; ZHONG, B. Q.; DONG, P.; WANG, J. Ettringite formation and conditions for its stability. **J. Chinese Ceramic Society**. 12. 155-165. 1984.