



GUSTAVO SOARES SANTOS

**FIBROCIMENTO COM MODIFICAÇÃO CELULÓSICA POR
BABA DE CUPIM SINTÉTICA E APLICAÇÃO DE
REVESTIMENTO DE ETILENO ACETATO DE VINILA**

**LAVRAS – MG
2026**

GUSTAVO SOARES SANTOS

**FIBROCIMENTO COM MODIFICAÇÃO CELULÓSICA POR BABA DE CUPIM
SINTÉTICA E APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE ETILENO ACETATO DE
VINILA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais - PPGBIOMAT, área de concentração compósitos e nanocompósitos lignocelulósicos, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes (UFLA) - Brasil

Coorientador

Dr. Lorrان de Sousa Arantes (UFLA) - Brasil

Coorientador

Dr. Felipe Gomes Batista (UFLA) - Brasil

**LAVRAS – MG
2026**

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

Santos, Gustavo Soares.

Fibrocimento com modificação celulósica por baba de cupim sintética e aplicação
de revestimento de etileno acetato de vinila / Gustavo Soares Santos. - 2026.
70 p.

Orientador: Lourival Marin Mendes

Coorientador: Lorrán de Sousa Arantes

Coorientador: Felipe Gomes Batista

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2026.

Bibliografia.

1. Fibras lignocelulósicas. 2. Durabilidade. 3. Materiais cimentícios. 4. Conforto
térmico. 5. Eficiência energética. I. Mendes, Lourival Marin. II. Arantes, Lorrán de
Sousa. III. Batista, Felipe Gomes. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

GUSTAVO SOARES SANTOS

**FIBROCIMENTO COM MODIFICAÇÃO CELULÓSICA POR BABA DE CUPIM
SINTÉTICA E APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE ETILENO ACETATO DE
VINILA**

**FIBER CEMENT WITH CELLULOSE MODIFICATION BY SYNTHETIC
TERMITE SLIME AND APPLICATION OF VINYL ACETATE ETHYLENE
COATING**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais - PPGBIOMAT, área de concentração compósitos e nanocompósitos lignocelulósicos, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 17 de julho de 2026

Dr. Lourival Marin Mendes - UFLA

Dra. Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira - UFLA

Dr. Carlos Henrique da Silva - DCF/ESAL

Dra. Cínthia Aparecida Silva - UFG

Dr. Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita - UFSB



Documento assinado digitalmente

LOURIVAL MARIN MENDES

Data: 20/07/2026 14:59:11-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes (UFLA) - Brasil

Coorientador

Dr. Lorrán de Sousa Arantes (UFLA) - Brasil

Coorientador

Dr. Felipe Gomes Batista (UFLA) - Brasil

**LAVRAS – MG
2026**

*A minha mãe e ao meu esposo Átilla Vilela Franco,
pelo incentivo em todos os níveis, por me proporcionarem
toda força e base para que eu pudesse chegar até aqui!*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, a São José e a Santa Rita de Cássia por permitirem mais esta conquista.

À minha mãe, Mari Ângela, que me incentivou para que eu pudesse realizar este sonho.

Ao meu esposo, Átilla, pelos incentivos, pelos momentos inesquecíveis que compartilhamos e pela paciência de sempre.

Ao meu orientador, Prof. Lourival, e aos meus coorientadores, Lorrán e Felipe, pelos ensinamentos, pela paciência e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e sugestões, que enriqueceram e aprimoraram este trabalho.

Aos professores José Benedito e Gustavo Tonoli, pelo apoio e pelo incentivo ao longo desta trajetória.

Ao colega de curso Claret, que não mediu esforços para me ajudar e incentivar.

A todos os colegas, amigos e familiares que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e para mais esta importante etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Lavras – UFLA, ao Departamento de Ciências Florestais – DCF e ao Programa de Pós- Graduação Engenharia de Biomateriais da UFLA – PPGBIOMAT/UFLA, pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Doutorado.

Por fim, agradeço a Capes, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro, que tornou possível a realização do Doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

"O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos."

(Eleanor Roosevelt)

RESUMO

O tratamento de fibras lignocelulósicas tem sido amplamente investigado como estratégia para melhorar a durabilidade e a interação fibra-matriz em materiais cimentícios. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do tratamento de fibras comerciais de eucalipto com baba de cupim sintética (BCS), associado ao revestimento com etileno-acetato de vinila (EVA), sobre o desempenho físico, mecânico, térmico, termogravimétrico (TG/DTG) e microestrutural de compósitos de fibrocimento produzidos por extrusão, antes e após o envelhecimento acelerado. Foram produzidos compósitos de referência (CR), compósitos revestidos com EVA (CRE), compósitos contendo fibras tratadas com BCS (CB) e compósitos contendo fibras tratadas com BCS associados ao revestimento com EVA (CBE). A comparação dos resultados obtidos antes e após o envelhecimento acelerado evidenciou redução da absorção de água e da porosidade aparente em todos os grupos experimentais, bem como aumento da densidade aparente na maioria dos compósitos, indicando modificações microestruturais decorrentes da continuidade das reações de hidratação da matriz cimentícia. Destacou-se o grupo CB, que apresentou redução de aproximadamente 60,5% na absorção de água, aumento de aproximadamente 23,1% na densidade aparente, manutenção do módulo de ruptura após o envelhecimento acelerado e redução de aproximadamente 7,0% na condutividade térmica. O grupo CBE apresentou aumento de aproximadamente 52,6% na tenacidade, indicando maior capacidade de dissipação de energia após o envelhecimento. Os grupos CR e CRE também apresentaram reduções na absorção de água após o envelhecimento acelerado, mantendo desempenho compatível com os requisitos normativos. As análises TG/DTG não evidenciaram alterações significativas na estabilidade térmica nem nos principais eventos de degradação dos compósitos, enquanto as análises microestruturais sugeriram maior continuidade da matriz cimentícia e alterações na interface fibra-matriz após o envelhecimento. Além disso, todos os grupos experimentais atenderam aos requisitos da ABNT NBR 15498 (2012), apresentando absorção de água inferior a 35% e módulo de ruptura superior a 4 MPa. Conclui-se que os tratamentos empregados, especialmente nos grupos CB e CBE, mostraram-se promissores para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais duráveis e com melhor desempenho térmico, evidenciando potencial para aplicações na construção civil que demandem maior conforto térmico e eficiência energética.

Palavras-chave: fibras lignocelulósicas; durabilidade; materiais cimentícios; conforto térmico; eficiência energética.

ABSTRACT

The treatment of lignocellulosic fibers has been widely investigated as a strategy to improve durability and fiber–matrix interaction in cementitious composites. In this context, this study aimed to evaluate the effects of treating commercial eucalyptus fibers with synthetic termite saliva (STS), associated with an ethylene-vinyl acetate (EVA) coating, on the physical, mechanical, thermal, thermogravimetric (TG/DTG), and microstructural performance of extruded fiber-cement composites before and after accelerated aging. Reference composites (CR), EVA-coated composites (CRE), composites containing STS-treated fibers (CB), and composites containing STS-treated fibers associated with EVA coating (CBE) were produced. The comparison of the results obtained before and after accelerated aging revealed a reduction in water absorption and apparent porosity, as well as an increase in apparent density in all experimental groups, indicating greater densification of the cementitious matrix and reduced water accessibility within the composites. The CB group stood out, exhibiting an approximately 60.5% reduction in water absorption, a 23.1% increase in apparent density, a 4.3% increase in modulus of rupture, and a 7.0% reduction in thermal conductivity. The CBE group showed an approximately 52.6% increase in toughness, indicating greater energy dissipation capacity after aging. The CR and CRE groups also exhibited stability in their physical and mechanical properties after accelerated aging. TG/DTG analyses did not reveal significant changes in thermal stability or in the main degradation events of the composites, while microstructural analyses suggested greater continuity of the cementitious matrix and changes in the fiber–matrix interface after aging. All experimental groups met the requirements of ABNT NBR 15498 (2012), presenting water absorption values below 35% and modulus of rupture values above 4 MPa. It was concluded that the proposed treatments, especially in the CB and CBE groups, are promising for the development of more durable cementitious materials with improved thermal performance, demonstrating potential for applications in construction systems requiring enhanced thermal comfort and energy efficiency.

Keywords: lignocellulosic fibers; cementitious materials; durability; thermal comfort; energy efficiency.

INDICADORES DE IMPACTO

Os resultados desta tese evidenciam potenciais impactos científicos, tecnológicos, econômicos, ambientais e de extensão, decorrentes da proposição inédita do tratamento de fibras comerciais de eucalipto com baba de cupim sintética associada ao revestimento com EVA para aplicação em compósitos de fibrocimento extrudado. A redução da condutividade térmica, associada à melhoria do desempenho físico e à manutenção de propriedades mecânicas em determinados tratamentos após o envelhecimento acelerado, demonstra o potencial para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais duráveis e energeticamente eficientes, capazes de contribuir para o conforto térmico das edificações e para a redução do consumo energético no ambiente construído. Do ponto de vista tecnológico, a pesquisa amplia o conhecimento acerca de estratégias de modificação de fibras lignocelulósicas e fornece bases científicas para o desenvolvimento de novos produtos e processos aplicáveis à indústria de materiais cimentícios. Sob os aspectos econômico e ambiental, os conhecimentos gerados podem contribuir para a produção de componentes construtivos com potencial para maior vida útil e para a ampliação do uso de matérias-primas renováveis, em consonância com os princípios da construção sustentável. No âmbito da extensão, os resultados obtidos apresentam potencial para subsidiar ações de difusão científica, capacitação profissional e transferência de tecnologia, contribuindo para a formação de recursos humanos qualificados e para a aproximação entre universidades, centros de pesquisa e o setor produtivo. Os impactos identificados possuem caráter potencial e abrangência principalmente nacional, beneficiando instituições de pesquisa, programas de pós-graduação, pesquisadores, estudantes e o setor produtivo ligado à indústria de fibrocimento e materiais para construção civil. A pesquisa apresenta potencial de enquadramento nas áreas temáticas de Tecnologia e Produção, Meio Ambiente e Educação, estando alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, especialmente ao ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura, ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis, ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis e ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima, ao contribuir para o desenvolvimento de materiais construtivos mais inovadores, sustentáveis e com potencial para maior eficiência energética e redução dos impactos ambientais associados ao ambiente construído.

IMPACT INDICATORS

The results of this thesis demonstrate potential scientific, technological, economic, environmental, and extension impacts arising from the novel application of synthetic termite saliva treatment on commercial eucalyptus fibers associated with ethylene-vinyl acetate (EVA) coating for use in extruded fiber-cement composites. The reduction in thermal conductivity, combined with improved physical performance and the maintenance of mechanical properties in specific treatments after accelerated aging, highlights the potential for developing more durable and energy-efficient cementitious materials capable of contributing to thermal comfort in buildings and reducing energy consumption in the built environment. From a technological perspective, this research expands the knowledge regarding modification strategies for lignocellulosic fibers and provides scientific foundations for the development of new products and processes applicable to the cement-based materials industry. From economic and environmental perspectives, the knowledge generated may contribute to the production of construction components with the potential for increased service life and expanded use of renewable raw materials, in accordance with the principles of sustainable construction. In terms of extension activities, the findings may support scientific dissemination initiatives, professional training programs, and technology transfer actions, contributing to the education of qualified human resources and strengthening the interaction between universities, research centers, and the productive sector. The identified impacts are potential in nature and mainly national in scope, benefiting research institutions, graduate programs, researchers, students, and the productive sector related to the fiber-cement and construction materials industries. Furthermore, this research has potential alignment with the thematic areas of Technology and Production, Environment, and Education, and is consistent with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 9 – Industry, Innovation and Infrastructure, SDG 11 – Sustainable Cities and Communities, SDG 12 – Responsible Consumption and Production, and SDG 13 – Climate Action, by contributing to the development of more innovative and sustainable construction materials with potential for greater energy efficiency and reduced environmental impacts associated with the built environment.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1 - Extrusora para produção de fibrocimento.....	24
Figura 2 - Estrutura hierárquica da madeira e resistência à tração em diferentes níveis estruturais.....	28

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Figura 1 - Preparação das fibras de polpa de eucalipto: (a) misturador de hélice vertical do tipo turbo; (b) Pasta final da fibra.....	37
Figura 2 - Processos de produção dos compósitos: (a) mistura manual dos materiais; (b) misturador mecânico dos materiais; (c) máquina extrusora; (d) corpos de prova extrudados; (e) corpos de prova selados a vácuo.....	38
Figura 3 - Fluxograma experimental.	43
Figura 4 - Curvas termogravimétricas (TG) e derivadas (DTG) das fibras: (a) TG e (b) DTG.	45
Figura 5 - Curvas termogravimétrica (TG) e derivada (DTG) do EVA.....	46
Figura 6 - Valores médios $\pm$ desvio padrão das propriedades físicas dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado: (a) porosidade; (b) absorção de água; (c) densidade aparente. ..	48
Figura 7 - Valores médios $\pm$ desvio padrão das propriedades mecânicas dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado: (a) módulo de elasticidade; (b) módulo de ruptura; (c) tenacidade.	50
Figura 8 - Curvas força $\times$ deformação dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado.	51
Figura 9 - Valores médios $\pm$ desvio padrão de condutividade térmica dos compósitos antes e após envelhecimento acelerado.	55
Figura 10 - Curvas termogravimétricas (TG) e derivadas (DTG) dos compósitos experimentais: (a) TG e (b) DTG antes do envelhecimento acelerado; (c) TG e (d) DTG após o envelhecimento acelerado.....	57
Figura 11 - Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado.....	59

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Tabela 1 - Composição em massa (kg) dos materiais por extrusão.....	37
Tabela 2 - Composição química das fibras.....	44

LISTA DE SIGLAS

BCS	Baba de Cupim Sintética
EVA	Etileno-Acetato de Vinila
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
UEPAM	Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira
HPMC	Hidroxipropilmetilcelulose
AA	Absorção de Água
DA	Densidade Aparente
PA	Porosidade Aparente
MOR	Módulo de Ruptura
MOE	Módulo de Elasticidade
EPS	Poliestireno Expandido
TG	Termogravimétrica
DTG	Termogravimetria Derivada
CR	Compósito de Referência
CRE	Compósito com Fibras Revestidas com EVA
CB	Compósito com Fibras Tratadas com BCS
CBE	Compósito com Fibras Tratadas com BCS e Posteriormente Revestidas com EVA

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	17
1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1 Fibrocimento	20
3.1.1 Fibrocimento na construção contemporânea	21
3.1.2 Processo de produção	23
3.1.3 Propriedades do Fibrocimento	25
3.2 Fibras celulósicas	27
3.3 Baba de Cupim Sintética	28
3.4 Etileno Acetato de Vinila	30
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	31
1 INTRODUÇÃO	33
2 MATERIAL E MÉTODOS	34
2.1 Materiais	35
2.2 Métodos	35
2.2.1 Caracterização química das fibras de polpa de eucalipto	35
2.2.2 Caracterização física do EVA	35
2.2.3 Caracterização térmica por análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG)	36
2.2.4 Produção do Fibrocimento	36
2.2.5 Revestimento com EVA	38
2.2.6 Propriedades Físicas	39
2.2.7 Propriedades Mecânicas	40
2.2.8 Análise da condutividade térmica	40
2.2.9 Análises Microestruturais	41
2.2.10 Envelhecimento acelerado	42
2.3 Análise dos resultados	42
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

3.1 Análise química e termogravimétrica (TG/DTG) das fibras.....	43
3.2 Análise física e termogravimétrica (TG/DTG) do EVA.....	46
3.3 Análise das propriedades físicas dos compósitos.....	47
3.4 Análise das propriedades mecânicas dos compósitos.....	50
3.5 Análise da condutividade térmica dos compósitos	54
3.6 Análise termogravimétrica (TG/DTG) dos compósitos	56
3.7 Análise microestrutural dos compósitos.....	59
4 CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS	63

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem passado por um processo de transformação tecnológica e ambiental, impulsionado pela necessidade de reduzir impactos ecológicos, economizar recursos naturais e substituir materiais críticos. Nesse contexto, o fibrocimento destaca-se como um dos materiais mais utilizados em coberturas e painéis devido à sua durabilidade, resistência mecânica e custo competitivo. Entretanto, sua evolução depende cada vez mais da substituição de fibras convencionais por alternativas sustentáveis, alinhadas ao movimento global por materiais de menor impacto ambiental. Estudos recentes apontam que a engenharia de compósitos cimentícios tem avançado rapidamente para atender esses novos requisitos (Da Silva Neto *et al.*, 2025).

Historicamente, o amianto foi amplamente empregado no fibrocimento devido à sua elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e baixo custo; entretanto, os riscos à saúde associados às suas fibras levaram à sua proibição em diversos países e impulsionaram a busca por substitutos seguros. Nesse contexto, o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras alternativas consolidou-se como uma importante linha de pesquisa, com foco na performance e na durabilidade das novas formulações (Li *et al.*, 2023). Com a substituição do amianto, o setor de materiais cimentícios passou a empregar fibras sintéticas, naturais e híbridas, visando manter ou superar as propriedades do fibrocimento tradicional (ANF, 2025).

As pesquisas com fibras naturais também se concentram nos desafios relacionados à durabilidade e à interação matriz-fibra, uma vez que a elevada alcalinidade da matriz cimentícia pode promover a degradação dessas fibras ao longo do tempo (Liu; Lv, 2021; Rocha *et al.*, 2022). Esse cenário tem motivado estudos voltados ao tratamento das fibras, à aplicação de tratamentos químicos e à otimização dos parâmetros de processamento. Trabalhos recentes demonstram que, com técnicas adequadas de processamento e tratamento, fibras celulósicas podem apresentar desempenho mecânico satisfatório em compósitos fibrocimentícios, viabilizando sua aplicação como material de reforço (Hasan *et al.*, 2021).

Além das fibras naturais, materiais poliméricos têm desempenhado papel crescente na melhoria do fibrocimento. O etileno-acetato de vinila (EVA) é um dos aditivos poliméricos mais estudados para modificação da matriz, contribuindo para melhor coesão interna, maior tenacidade e alterações favoráveis no comportamento reológico (Yeon *et al.*, 2019).

A literatura recente enfatiza que os compósitos cimentícios reforçados, especialmente aqueles com adição de polímeros e fibras naturais, representam um caminho promissor para o desenvolvimento de materiais de alto desempenho (ANF, 2025). Da Silva Neto *et al.* (2025)

reforçam que o avanço dos compósitos reforçados depende do entendimento microestrutural e da capacidade de manipular propriedades como tenacidade, resistência ao impacto e conformabilidade, aspectos essenciais para a modernização do fibrocimento.

Atualmente, estima-se que haja uma expansão na produção de fibrocimento, uma vez que a construção habitacional vem sendo incentivada pela urbanização e pelos investimentos em infraestrutura em diversas regiões do mundo, além disso, as características do fibrocimento, tais como alta durabilidade, resistência a agentes climáticos, fogo e pragas, facilidade de instalação, baixa manutenção e boa compatibilidade com diferentes tipos de acabamentos, corroboram para esse crescimento e para sua maior utilização, havendo projeção de crescimento de 47,36 milhões de toneladas até 2029 (Mordor Intelligence, 2024).

Apesar dos avanços obtidos com fibras vegetais e aditivos poliméricos, ainda persistem desafios relacionados à baixa adesão interfacial entre fibras lignocelulósicas e a matriz cimentícia, bem como à degradação dessas fibras em ambiente alcalino (Teixeira *et al.*, 2022).

Diante desse contexto, esta pesquisa propõe investigar o tratamento de fibras comerciais de polpa kraft branqueada de eucalipto com baba de cupim sintética como estratégia para melhorar a interação fibra-matriz, associado à aplicação de revestimento com etileno-acetato de vinila (EVA) em compósitos de fibrocimento extrudado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do tratamento de fibras comerciais de polpa kraft branqueada de eucalipto com baba de cupim sintética (BCS) e da aplicação de revestimento de etileno-acetato de vinila (EVA) em compósitos de fibrocimento extrudado, antes e após o envelhecimento acelerado.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar as propriedades químicas das fibras comerciais de polpa kraft branqueada de eucalipto;
- b) Determinar as propriedades físicas do etileno-acetato de vinila (EVA);
- c) Avaliar o comportamento térmico das fibras de eucalipto tratadas e não tratadas com baba de cupim sintética (BCS) e do EVA por meio de análises termogravimétricas (TG/DTG);
- d) Produzir compósitos de fibrocimento extrudado utilizando fibras de eucalipto tratadas e não tratadas com baba de cupim sintética (BCS);
- e) Determinar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos;
- f) Determinar a condutividade térmica dos compósitos;
- g) Avaliar o comportamento termogravimétrico (TG/DTG) dos compósitos;
- h) Analisar a microestrutura dos compósitos por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Fibrocimento

O fibrocimento consolidou-se como um dos principais compósitos utilizados na construção civil desde a invenção do processo Hatschek no início do século XX, quando uma mistura de cimento, água e fibras de amianto conferia ao material elevada resistência mecânica e durabilidade, permitindo a fabricação de chapas, telhas e painéis de qualidade industrial (Tonoli *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2022).

Apesar da eficiência estrutural, o uso do amianto trouxe sérios impactos à saúde pública, especialmente pela inalação de fibras microscópicas, classificadas como cancerígenas por diversos organismos internacionais. Assim, ao longo das últimas décadas, vários países passaram a proibir ou restringir o uso de fibras de amianto, impulsionando o desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados com fibras alternativas e consolidando uma nova geração de fibrocimento sem amianto (Zhang *et al.*, 2025).

Com a necessidade de substituição das fibras de amianto, estudos passaram a focar em fibras sintéticas e em fibras naturais, especialmente as lignocelulósicas, devido ao menor impacto ambiental e ao bom desempenho mecânico relativo. Investigações recentes demonstram que o avanço no entendimento dos mecanismos de interação fibra-matriz tem permitido o desenvolvimento de compósitos de alto desempenho, com maior tenacidade e controle de fissuração. Um estudo recente destaca os progressos, desafios e perspectivas no projeto de compósitos cimentícios reforçados por fibras, enfatizando estratégias para melhorar resistência, durabilidade e comportamento mecânico (Tonoli *et al.*, 2019; Silva Neto *et al.*, 2025).

Além disso, fatores como distribuição e orientação das fibras, tratamento superficial, afinidade química e presença de aditivos afetam de forma decisiva o desempenho final das matrizes reforçadas. A pesquisa de Soares *et al.* (2025), por exemplo, analisou a influência de surfactantes no comportamento do fibrocimento extrudado reforçado com fibras de sisal *in natura*, evidenciando que a modificação da interface pode alterar significativamente a absorção de água, a trabalhabilidade da mistura e os parâmetros mecânicos.

A durabilidade é outro ponto central na evolução do fibrocimento moderno, especialmente quando reforçado com fibras naturais. Estudo recente aborda a influência da hornificação, processo de endurecimento e colapso estrutural causado por ciclos de secagem, e do efeito da carbonatação no comportamento mecânico de compósitos de fibrocimento,

demonstrando que esses fenômenos podem alterar substancialmente a rigidez e a integridade estrutural do material ao longo do tempo (Zhang *et al.*, 2025).

Além disso, a exposição a condições ambientais variáveis, como ciclos de umedecimento e secagem, pode intensificar processos de degradação, afetando tanto a estabilidade dimensional das fibras lignocelulósicas quanto a integridade da matriz cimentícia. Esse comportamento reforça a necessidade de estratégias que contribuam para a estabilização da interface fibra-matriz e para o aumento da durabilidade dos compósitos fibrocimentícios (Savastano Junior *et al.*, 2005; Tonoli *et al.*, 2010).

Além dos aspectos técnicos e estruturais, o fibrocimento também tem sido amplamente discutido sob a ótica da sustentabilidade, uma vez que a substituição do amianto por fibras naturais ou sintéticas menos tóxicas é considerada uma demanda social e ambiental. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) indicam que o uso de fibras alternativas pode reduzir significativamente os impactos ambientais em comparação ao amianto e demais métodos, especialmente nas categorias relacionadas à toxicidade humana, à ecotoxicidade e à poluição atmosférica (Sousa *et al.*, 2022).

3.1.1 Fibrocimento na construção contemporânea

O fibrocimento consolidou-se como material versátil na construção contemporânea ao reunir leveza, resistência mecânica e adaptabilidade construtiva. Composto por uma matriz cimentícia reforçada com fibras celulósicas, sintéticas ou naturais, o material substituiu progressivamente o amianto em diferentes aplicações, reduzindo riscos à saúde sem comprometer o desempenho estrutural, especialmente em peças delgadas como telhas e painéis (Filomeno, 2023; Fundacentro, 2024).

Em coberturas, as telhas de fibrocimento permanecem entre as soluções mais adotadas graças ao seu custo-benefício, facilidade de montagem e baixa manutenção. Avanços recentes nas formulações, incluindo a combinação de fibras e aditivos surfactantes, têm ampliado propriedades como módulo de ruptura, tenacidade e resistência a ciclos de umedecimento e secagem, fatores essenciais para climas tropicais úmidos (Biskri *et al.*, 2025).

Para fachadas e revestimentos, os painéis de fibrocimento oferecem módulos de grandes dimensões, boa planicidade e compatibilidade com diversos acabamentos, como pinturas, texturas e revestimentos minerais. Essas características tornam o material uma alternativa a revestimentos cerâmicos e sistemas de alumínio composto, sobretudo quando se exige fixação mecânica direta e elevado desempenho frente às intempéries. A estabilidade dimensional e a

resistência a ataques biológicos reforçam sua adequação a fachadas ventiladas (Swisspearl, 2022; Manso-Morato, 2024).

A construção a seco, particularmente em sistemas modulares e painéis, tem integrado o fibrocimento como solução para vedação e forros em ambientes úmidos, já que as placas resistem ao apodrecimento, fungos e pragas. Essa durabilidade favorece a aplicabilidade em retrofit de fachadas e em obras rápidas, baseadas em estruturas metálicas ou de madeira (Filomeno, 2023).

No campo da sustentabilidade, estudos recentes abordam o fibrocimento em análises de ciclo de vida e estratégias de redução da pegada de carbono. Substituições parciais de cimento por adições minerais, como cinzas volantes e metacaulim, bem como o uso de fibras de origem residual, contribuem para o menor impacto ambiental sem necessariamente prejudicar o desempenho mecânico, desde que as dosagens sejam adequadas (Manso-Morato, 2024; Mehmood *et al.*, 2025).

A pesquisa em fibras naturais, como sisal, coco e curauá e o aperfeiçoamento dos tratamentos químicos, têm buscado superar a incompatibilidade entre fibra e matriz cimentícia. Avanços como pré-tratamentos, uso de surfactantes e técnicas de grafting promovem melhor adesão na interface e aumentam a durabilidade do compósito, abrindo caminho para materiais de baixo custo e reduzido impacto ambiental (Soares *et al.*, 2025; Barros, 2023).

Na arquitetura contemporânea, o fibrocimento não se destaca apenas pela função estrutural, mas também pelo potencial estético e funcional. A produção de peças vazadas, brises e painéis paramétricos por moldagem ou prensagem amplia o controle de sombreamento, ventilação e estética, aliando desempenho térmico passivo a possibilidades formais mais sofisticadas (Swisspearl, 2022; Zhu *et al.*, 2025).

A durabilidade continua sendo um dos principais focos de investigação. Estudos de carbonatação acelerada, ciclos térmicos e absorção de água mostram que tratamentos de cura e aditivos específicos podem reduzir a porosidade capilar, fortalecer a ligação fibra–matriz e minimizar fissurações por retração. Esses avanços reduzem a perda de resistência após envelhecimento e reforçam a adequação do material para aplicações externas de longa vida útil (Filomeno, 2023).

Na industrialização da construção, o fibrocimento se destaca por favorecer processos produtivos padronizados, como sistemas encaixáveis e painéis pré-fabricados. A rapidez de montagem e a redução de resíduos de obra tornam o material atrativo para programas habitacionais e soluções emergenciais, onde a agilidade construtiva é essencial (Swisspearl, 2022; Manso-Morato, 2024).

3.1.2 Processo de produção

O processo de produção do fibrocimento pode ser conduzido por diferentes rotas industriais, sendo o processo Hatschek e a extrusão as tecnologias mais consolidadas para a fabricação de placas, telhas e perfis cimentícios. Cada método promove condições específicas de mistura, compactação e orientação das fibras, influenciando diretamente a densidade, a porosidade, o módulo de elasticidade e a durabilidade final do compósito (Tonoli *et al.*, 2019; Teixeira *et al.*, 2022).

De acordo com Filomeno (2023), a rota produtiva determina desde o tipo de fibra compatível até a viabilidade de aditivos modificadores, como agentes celulósicos, polímeros de interface e revestimentos de pós-tratamento. Nesse sentido, a escolha do processo produtivo é estratégica para o desempenho do fibrocimento e tem sido determinante para possibilitar a incorporação de fibras vegetais modificadas e de reforços híbridos.

O processo Hatschek é o mais tradicional na indústria, caracterizado pela utilização de uma suspensão cimentícia altamente diluída, normalmente entre 4 e 10% de sólidos, que é depositada sobre cilindros filtrantes e acumulada em camadas sucessivas (Filomeno, 2023). Após a formação da manta, o material é comprimido e moldado na geometria final, produzindo elementos com distribuição aleatória de fibras e maior fração de poros. Teixeira (2017) aponta que a elevada quantidade de água do processo compromete a densificação e pode intensificar fenômenos de degradação de fibras celulósicas, exigindo etapas adicionais de cura e tratamentos superficiais para reduzir absorção de água. Apesar dessas limitações, o processo Hatschek mantém grande vantagem produtiva devido ao fluxo contínuo e baixo custo operacional.

Em contraste, o processo de extrusão configura-se como uma rota capaz de produzir compósitos mais densos e com maior controle geométrico, uma vez que utiliza misturas com baixa relação água/cimento e aplica elevada compactação mecânica. A extrusão pode ocorrer de duas formas: por pistão, quando a massa é empurrada por pressão direta ao longo de um cilindro até a matriz de conformação; ou por rosca, quando um elemento helicoidal transporta, cisalha e compacta a mistura até sua extrusão (Soto, 2010).

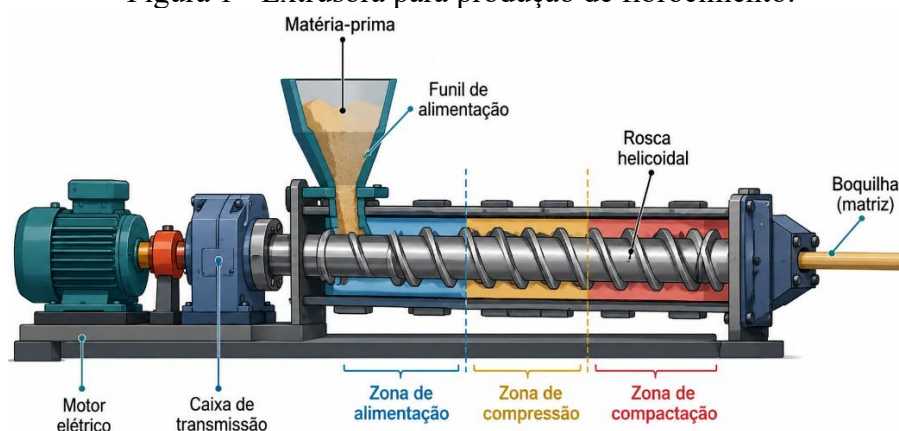
Os métodos de extrusão operam com teores significativamente menores de água em comparação ao processo Hatschek, permitindo a obtenção de matrizes mais coesas e com microestrutura mais homogênea. Entretanto, existem distinções operacionais importantes: a extrusão por pistão produz estados de tensão mais uniformes na seção transversal, sendo amplamente utilizada quando se busca geometrias robustas e compósitos de maior espessura;

por outro lado, a extrusão por rosca induz maior cisalhamento e orientação parcial das fibras ao longo da direção de extrusão, favorecendo o aumento da resistência à flexão (Fonseca *et al.*, 2016).

A utilização de baixos teores de água de mistura, tipicamente entre 30% e 40% da empregada no processo Hatschek, contribui para a redução da formação de poros, diminui o potencial de degradação das fibras e promove maior densificação da matriz (Teixeira, 2017). Essa característica torna a extrusão mais compatível com fibras modificadas, aditivos poliméricos e reforços híbridos, permitindo o desenvolvimento de formulações avançadas que não são processáveis em suspensões diluídas. Além disso, estudos recentes indicam que o processo apresenta elevada robustez para a incorporação de resíduos minerais, aditivos reológicos complexos e partículas finas alternativas, ampliando o potencial de sustentabilidade da cadeia produtiva (Tonoli *et al.*, 2019; Fonseca *et al.*, 2016).

A Figura 1 apresenta um esquema funcional de uma extrusora utilizada na conformação de fibrocimento.

Figura 1 - Extrusora para produção de fibrocimento.



Fonte: Adaptado de Batista (2024).

O equipamento de extrusão é constituído por diferentes componentes que atuam de forma sequencial no processamento da massa cimentícia. Inicialmente, a mistura é inserida no funil de alimentação, sendo conduzida pela rosca helicoidal ao interior do cilindro da extrusora. Na zona de alimentação, o material é transportado e distribuído ao longo da rosca. Em seguida, na zona de compressão, ocorre a redução gradual do volume disponível para a massa, promovendo sua compactação inicial, homogeneização e eliminação parcial do ar aprisionado, o que contribui para o aumento da densidade do material. Posteriormente, a mistura atinge a zona de compactação, onde é submetida a maiores esforços mecânicos, resultando em maior

coesão interna e estabilidade estrutural antes da conformação. Por fim, o material é forçado através da boquilha (matriz), responsável por definir a geometria final do produto, possibilitando a produção contínua de elementos com dimensões e formatos específicos (Tonoli *et al.*, 2019; Batista *et al.*, 2024).

3.1.3 Propriedades do Fibrocimento

Entre as propriedades mecânicas mais relevantes para a avaliação do desempenho estrutural do fibrocimento, destaca-se o módulo de ruptura (MOR), parâmetro fundamental para caracterizar a resistência à flexão do compósito. Em placas de fibrocimento, esse valor geralmente varia entre 8 e 13 MPa, dependendo do tipo de fibra utilizada, da composição da matriz, do método de produção e das condições de cura. Essa faixa é amplamente relatada na literatura, sobretudo em estudos envolvendo telhas e painéis produzidos sem amianto, utilizando fibras vegetais ou sintéticas como reforço (Savastano Junior *et al.*, 2005; Dias, 2011).

Em investigações específicas sobre o uso de fibras de coco, Khamput *et al.* (2024) observaram valores de MOR entre 8,53 e 12,96 MPa em compósitos cimentícios, resultado que evidencia o potencial desse tipo de reforço natural para aplicações não estruturais. Os autores destacam que a estabilidade dimensional da fibra de coco e sua capacidade de formar uma interface adequada com a matriz contribuem para o desempenho observado. Esses valores se alinham à faixa típica reportada para fibrocimento reforçado com fibras vegetais, reforçando a consistência entre diferentes formulações estudadas na literatura.

Estudos clássicos sobre fibrocimento sem amianto, como o de Dias (2011), utilizando fibras sintéticas como reforço, reportaram valores médios de resistência à tração de até 12 MPa para telhas fabricadas por processos industriais consolidados. Esses resultados demonstram que, mesmo com a substituição do amianto por fibras sintéticas ou naturais, é possível atingir níveis de resistência compatíveis com os requisitos normativos para produtos de fibrocimento destinados a coberturas.

A variação do MOR depende diretamente do teor de fibras, da dispersão no interior da matriz e da eficiência da interface fibra–cimento. Compósitos com teor insuficiente de fibras tendem a apresentar ruptura frágil, enquanto teores elevados podem causar aumento de porosidade e redução da resistência, relação já descrita por Tonoli *et al.* (2010) e Teixeira *et al.* (2022) ao investigar fibrocimento com diferentes fibras lignocelulósicas. Além disso, as condições de cura (natural ou autoclavada) exercem influência significativa, sendo amplamente relatado que a autoclavagem melhora a estabilidade microestrutural ao favorecer a formação de

tobermorita, resultando em matrizes mais densas e, conseqüentemente, com maiores valores de MOR (Savastano Junior *et al.*, 2005).

A interface fibra-matriz é um dos fatores preponderantes para o comportamento mecânico pós-fissuração. Em compósitos reforçados com fibras vegetais, tratamentos químicos ou surfactantes são frequentemente utilizados para reduzir a absorção de água pelas fibras e melhorar a aderência interfacial. O estudo de Savastano Junior *et al.* (2005) demonstrou que o tratamento das fibras de sisal com NaOH ou agentes de superfície promoveu incrementos superiores a 20% no MOR em comparação a fibras *in natura*, efeito explicado pela melhoria da ancoragem mecânica e redução de impurezas superficiais. Investigações similares com fibras de eucalipto e bambu reforçam esse comportamento, mostrando incrementos variando entre 15% e 35% dependendo do tipo de tratamento (Tonoli *et al.*, 2010; Mohr *et al.*, 2005).

Além dos fatores relacionados à composição e ao processamento, o desempenho do fibrocimento está diretamente associado à sua estabilidade ao longo do tempo, especialmente quando exposto a condições ambientais variáveis. Em compósitos reforçados com fibras vegetais, a interação com a matriz cimentícia pode ser afetada por processos de degradação, como o ataque alcalino às fibras e a lixiviação de produtos de hidratação. Esses fenômenos podem alterar a integridade da interface fibra-matriz e a continuidade da matriz, influenciando o comportamento mecânico e a durabilidade do material ao longo de sua vida útil (Savastano Junior *et al.*, 2005; Tonoli *et al.*, 2010).

Do ponto de vista microestrutural, análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizadas por Mohr *et al.* (2005) revelaram a presença de pontos característicos de falha, como microfissuras na interface e extração de fibras (*pull-out*), mecanismos que dominam o comportamento pós-fissuração e explicam a pseudoductilidade observada em compósitos reforçados com fibras vegetais. Esses mecanismos também estão associados à dissipação de energia, impactando diretamente a tenacidade e a capacidade de deflexão do material.

A porosidade e a absorção de água também influenciam diretamente o MOR, uma vez que a presença de vazios afeta a densidade e a capacidade de transferência de tensões na matriz. Tonoli *et al.* (2019) mostraram que compósitos produzidos com melhor refino das polpas e controle da distribuição granulométrica apresentam estruturas matriciais mais densas e, conseqüentemente, maiores valores de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE).

A interação entre características como resistência mecânica, tenacidade, relativa leveza, estabilidade dimensional e durabilidade posiciona o fibrocimento entre os compósitos mais

relevantes para a construção civil. Suas propriedades são altamente ajustáveis por meio da seleção de fibras, adições minerais, processos de cura e aditivos, permitindo atender demandas crescentes por sustentabilidade, controle térmico, desempenho estrutural e vida útil prolongada (Mehmood *et al.*, 2025).

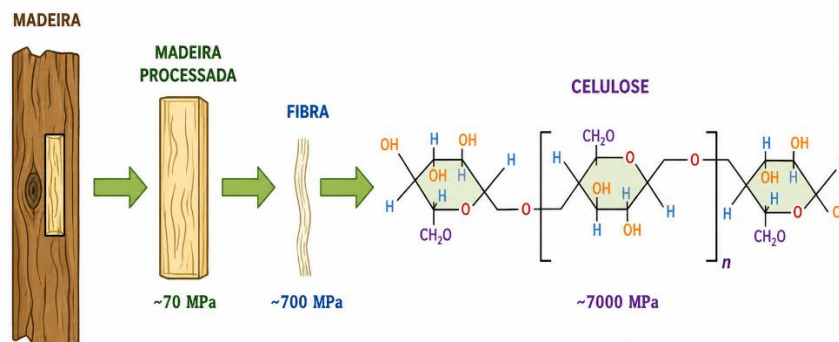
3.2 Fibras celulósicas

As fibras celulósicas são materiais lignocelulósicos constituídos predominantemente por celulose, hemiceluloses e lignina, organizados em uma estrutura hierárquica complexa que determina suas propriedades físicas, mecânicas e químicas. Em nível microscópico, as fibras são formadas por microfibrilas de celulose envolvidas por uma matriz amorfa composta principalmente por lignina e hemiceluloses. A celulose é o principal componente responsável pela resistência mecânica das fibras, enquanto a lignina atua como agente cimentante, promovendo a coesão entre as microfibrilas, e as hemiceluloses contribuem para a organização da parede celular e para a estabilidade estrutural do material (Coutts, 1986; Savastano Junior *et al.*, 2005; Fonseca, 2016).

Além da composição química, o desempenho mecânico das fibras depende da orientação das microfibrilas em relação ao eixo longitudinal, do grau de cristalinidade da celulose e da organização das camadas da parede celular. Esses fatores influenciam diretamente propriedades como resistência à tração, módulo de elasticidade e rigidez, o que torna as fibras celulósicas materiais promissores para aplicação como reforço em compósitos cimentícios (Coutts, 1986; Tonoli *et al.*, 2009).

A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, a estrutura hierárquica da madeira e a variação da resistência à tração em seus diferentes níveis estruturais, desde a madeira até a molécula de celulose.

Figura 2 - Estrutura hierárquica da madeira e resistência à tração em diferentes níveis estruturais.



Fonte: Adaptado de Coutts (1986).

Observa-se que a resistência à tração varia conforme o nível estrutural da madeira. Enquanto a madeira apresenta resistência da ordem de 70 MPa, as fibras celulósicas atingem aproximadamente 700 MPa e a celulose isolada pode alcançar valores próximos de 7000 MPa (Coutts, 1986). Essa comparação evidencia o elevado potencial mecânico da celulose, justificando o interesse pelo emprego de fibras celulósicas como material de reforço em compósitos cimentícios (Fonseca, 2016).

Em decorrência dessas características, a polpa celulósica consolidou-se como um dos principais materiais de reforço empregados na indústria do fibrocimento devido à sua elevada disponibilidade, facilidade de processamento, boa dispersão na matriz cimentícia e propriedades mecânicas compatíveis com essa aplicação. Paralelamente, diferentes estratégias de tratamento das fibras celulósicas vêm sendo estudadas com o objetivo de aprimorar sua compatibilidade com a matriz cimentícia e aumentar a durabilidade dos compósitos (Teixeira *et al.*, 2022; Schiavi *et al.*, 2024).

3.3 Baba de Cupim Sintética

A baba de cupim sintética (BCS) é um estabilizante químico desenvolvido que possui a capacidade de aumentar a coesão entre partículas de solo, reduz a permeabilidade e promove maior estabilidade física e mecânica em materiais de construção. Seu desenvolvimento ocorreu na década de 1970, fruto de pesquisas realizadas pela empresa Dynasolo S.A., resultando no produto DS-328®, obtido após a realização de 328 análises com diferentes tipos de solos (Dynasolo, s.d.). Atualmente, a empresa BlindaSolo® é uma das principais fabricantes do composto no Brasil.

A formulação da baba de cupim sintética é à base de óleos e resinas vegetais, que fica na forma de um líquido de coloração esverdeada, altamente solúvel em água. É um produto atóxico, não inflamável e não corrosivo, e, portanto, ambientalmente seguro, especialmente quando comparado a outros estabilizantes convencionais, como o cimento Portland ou cal hidratada. Ao ser misturado ao solo e entrar em contato com reagentes específicos, como sulfato de alumínio, cal ou cimento a BCS promove reações químicas que resultam na formação de compostos metalo-orgânicos insolúveis, que atuam como agentes ligantes entre as partículas minerais (Blindasolo, 2024).

A ação da BCS está baseada na criação de uma película viscosa que envolve as partículas do solo, promovendo a adesão entre elas e, ao mesmo tempo, reduzindo os vazios capilares. O que é característica essencial para a redução da absorção de água e do fenômeno de erodibilidade. A coesão promovida pela BCS entre os grãos minerais é favorecida por forças moleculares intensas, que geram um vínculo rígido e duradouro, contribuindo para o aumento da densidade e da estabilidade dos materiais tratados (Corrêa *et al.*, 2015).

Gandia *et al.* (2018) demonstraram que a aplicação da BCS em adobes resultou em melhorias expressivas na densidade aparente, coesão interna e estabilidade dimensional dos blocos, mesmo sem alterar significativamente sua resistência à compressão. Observou-se, ainda, uma significativa redução da capilaridade e da absorção de água, fatores que contribuem para a durabilidade de materiais expostos à umidade. Em consonância, Corrêa *et al.* (2015) destacaram que a aplicação da baba de cupim sintética em compósitos de terra proporcionou ganhos consideráveis em termos de integridade física e resistência ao intemperismo.

A BCS vem sendo utilizada, em grande parte, em obras de infraestrutura, principalmente na estabilização de solos para pavimentação de vias urbanas, estradas rurais, estacionamentos, ciclovias, pistas de pouso e áreas de tráfego pesado. Seu uso possibilita a substituição parcial ou total de materiais como brita e cimento, acarretando benefícios logísticos, econômicos e ambientais (Blindasolo, 2024). Além disso, por se tratar de um produto concentrado, de fácil aplicação e com forma simplificada de transporte, contribui para a redução do consumo de combustíveis fósseis e dos impactos ambientais associados ao deslocamento de insumos convencionais.

Mahamat *et al.* (2024) apontam que a adoção da baba de cupim sintética pode representar uma estratégia eficiente para a redução do impacto ambiental, especialmente quando comparada a métodos convencionais de modificação de materiais cimentícios, como o uso de aditivos e tratamentos químicos mais intensivos. Essa redução está associada, sobretudo, à melhoria da durabilidade dos compósitos, o que contribui para o aumento da vida útil dos

elementos construtivos e, conseqüentemente, para a diminuição da necessidade de manutenção e substituição de materiais.

3.4 Etileno Acetato de Vinila

O etileno-acetato de vinila (EVA) é um polímero termoplástico amplamente utilizado na modificação de matrizes cimentícias devido à sua capacidade de formar filmes coesivos e flexíveis no interior da matriz. Na forma de emulsão, o polímero favorece a formação de uma fase contínua após a cura, promovendo maior aderência entre os constituintes, redução da permeabilidade e aumento da coesão do material. Esses efeitos resultam em menor absorção de água, maior resistência à fissuração e melhoria da integridade superficial. Tais características tornam o EVA especialmente adequado como revestimento protetivo de compósitos frágeis, como o fibrocimento, contribuindo para o aumento da durabilidade e da resistência à degradação ambiental. (Bomediano; Gomes; Fontanini, 2020).

A modificação polimérica com EVA também influencia diretamente as propriedades reológicas das misturas cimentícias. Em estudo realizado por Yeon *et al.* (2019), a adição de EVA em misturas destinadas à impressão 3D alterou positivamente a trabalhabilidade e a capacidade de extrusão, demonstrando que o polímero aumenta a coesão e reduz a segregação sem comprometer a resistência inicial. Embora o foco do trabalho seja a construção aditiva, os resultados são plenamente aplicáveis ao revestimento de superfícies cimentícias, já que a melhoria da deformabilidade e da estabilidade da mistura contribui para melhor aderência e menor ocorrência de fissuras em revestimentos aplicados sobre fibrocimento.

No campo das propriedades mecânicas e desempenho em condições extremas, Li *et al.* (2025) investigaram argamassas de cimento sulfoaluminato modificadas com EVA e observaram melhorias relevantes na resistência ao fogo e na estabilidade térmica. O estudo destacou que o polímero forma uma fase contínua na matriz, capaz de reduzir a propagação de calor e retardar deformações estruturais.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

COMPÓSITOS DE FIBROCIMENTO EXTRUDADO COM FIBRAS DE EUCALIPTO TRATADAS COM BABA DE CUPIM SINTÉTICA E REVESTIMENTO EM EVA: DESEMPENHO ANTES E APÓS O ENVELHECIMENTO ACELERADO

RESUMO

A melhoria da durabilidade e do desempenho térmico de compósitos cimentícios reforçados com fibras é fundamental para ampliar sua aplicação na construção civil. Assim, o presente estudo avaliou os efeitos do tratamento de fibras de eucalipto com baba de cupim sintética (BCS) e da aplicação de revestimento em etileno-acetato de vinila (EVA) no desempenho de compósitos de fibrocimento extrudado antes e após envelhecimento acelerado. Foram produzidos compósitos de referência (CR), revestidos com EVA (CRE), contendo fibras tratadas com BCS (CB) e contendo fibras tratadas e revestidos com EVA (CBE). As propriedades físicas, mecânicas, térmicas, termogravimétricas e microestruturais foram avaliadas antes e após o envelhecimento. Os resultados evidenciaram redução da absorção de água e da porosidade em todos os grupos após o envelhecimento acelerado, acompanhadas pelo aumento da densidade aparente na maioria dos compósitos, indicando modificações microestruturais decorrentes da continuidade das reações de hidratação da matriz cimentícia. Destacou-se o grupo CB, que apresentou redução de aproximadamente 60,5% na absorção de água, aumento de 23,1% na densidade aparente, manutenção do módulo de ruptura após o envelhecimento acelerado e redução de 7,0% na condutividade térmica, indicando potencial para aplicações que demandem maior eficiência térmica. O grupo CBE apresentou aumento de aproximadamente 52,6% na tenacidade, evidenciando maior capacidade de dissipação de energia após o envelhecimento. Os grupos CR e CRE também apresentaram reduções na absorção de água após o envelhecimento acelerado, mantendo desempenho compatível com os requisitos normativos. Além disso, todos os compósitos atenderam aos requisitos da ABNT NBR 15498, apresentando absorção de água inferior a 35% e módulo de ruptura superior a 4 MPa. De modo geral, a utilização da BCS, associada ou não ao revestimento em EVA, mostrou-se uma estratégia promissora para o desenvolvimento de compósitos de fibrocimento mais duráveis e com melhor desempenho térmico.

Palavras-chave: durabilidade; desempenho térmico; construção civil; matriz cimentícia; eficiência térmica.

ABSTRACT

Improving the durability and thermal performance of fiber-reinforced cementitious composites is essential to expand their application in the construction industry. Therefore, this study evaluated the effects of treating eucalyptus fibers with synthetic termite saliva (BCS) and applying an ethylene-vinyl acetate (EVA) coating on the performance of extruded fiber-cement composites before and after accelerated aging. Reference composites (CR), EVA-coated composites (CRE), composites containing STS-treated fibers (CB), and composites containing STS-treated fibers coated with EVA (CBE) were produced. Physical, mechanical, thermal, thermogravimetric, and microstructural properties were evaluated before and after aging. The results showed reductions in water absorption and porosity in all groups after accelerated aging, accompanied by an increase in apparent density in most composites, indicating microstructural modifications resulting from the continuation of cement matrix hydration reactions. The CB group stood out, showing an approximately 60.5% reduction in water absorption, a 23.1% increase in apparent density, maintenance of the modulus of rupture after accelerated aging, and a 7.0% reduction in thermal conductivity, indicating potential for applications requiring improved thermal efficiency. The CBE group exhibited an approximately 52.6% increase in toughness, demonstrating a greater energy dissipation capacity after aging. The CR and CRE groups also showed reductions in water absorption after accelerated aging while maintaining performance compatible with normative requirements. Furthermore, all composites met the requirements of ABNT NBR 15498, presenting water absorption values below 35% and modulus of rupture values above 4 MPa. Overall, the use of synthetic termite saliva, associated or not with EVA coating, proved to be a promising strategy for developing more durable fiber-cement composites with improved thermal performance.

Keywords: durability; thermal performance; civil construction; cementitious matrix; thermal efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A evolução do fibrocimento nas últimas décadas está diretamente associada à substituição do amianto por fibras alternativas e ao desenvolvimento de compósitos capazes de manter desempenho mecânico, durabilidade e viabilidade industrial. Nesse contexto, o fibrocimento permanece como um dos materiais mais empregados em coberturas e painéis, em

razão de sua resistência, durabilidade e custo competitivo, consolidando-se como um importante material na cadeia produtiva da construção civil (Silva Neto *et al.*, 2025). A proibição do amianto em diversos países, decorrente dos riscos à saúde associados a essas fibras, impulsionou o desenvolvimento de compósitos de fibrocimento reforçados com fibras alternativas, visando preservar ou aprimorar o desempenho e a durabilidade do material (Li *et al.*, 2023). Entre essas alternativas, destacam-se as fibras lignocelulósicas vegetais, devido à sua ampla disponibilidade, caráter renovável e bom desempenho mecânico, especialmente em compósitos extrudados (Teixeira *et al.*, 2022; ANF, 2025).

Entre essas fibras, a polpa kraft de eucalipto destaca-se pela elevada disponibilidade no contexto brasileiro e pelo seu uso consolidado em compósitos cimentícios, devido às suas características favoráveis à dispersão e ao reforço mecânico (Savastano Junior *et al.*, 2005; Tonoli *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2025). Contudo, a durabilidade desses compósitos ainda representa um desafio, visto que a elevada alcalinidade da matriz cimentícia pode acelerar a degradação das fibras, comprometer a interface fibra-matriz e, consequentemente, reduzir o desempenho mecânico ao longo do tempo (Liu; Lv, 2021; Rocha *et al.*, 2022).

Paralelamente, diferentes estratégias têm sido investigadas para aumentar a estabilidade e a durabilidade desses materiais, destacando-se os tratamentos de fibras e o emprego de materiais poliméricos. Entre as abordagens emergentes, métodos bioinspirados vêm sendo propostos para modificar a interface fibra-matriz. Nesse sentido, a baba de cupim sintética (BCS) é proposta neste estudo como uma estratégia potencial para alterar a interação fibra-matriz. Entretanto, seu emprego como agente modificador de fibras em compósitos de fibrocimento, especialmente sob condições de envelhecimento acelerado, ainda é pouco explorado na literatura, justificando a investigação de sua influência sobre o desempenho desses materiais (Xaysombath *et al.*, 2025). Adicionalmente, o etileno-acetato de vinila (EVA) tem sido amplamente estudado por sua capacidade de modificar o comportamento reológico, aumentar a tenacidade e melhorar a coesão das matrizes cimentícias (Yeon *et al.*, 2019).

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do tratamento das fibras de eucalipto com baba de cupim sintética (BCS), associado ao revestimento com etileno-acetato de vinila (EVA), no desenvolvimento de compósitos de fibrocimento produzidos por extrusão, antes e após o envelhecimento acelerado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste estudo foi realizado no complexo laboratorial da Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM), da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais.

2.1 Materiais

Neste estudo, foram utilizados cimento Portland CPV-ARI, conforme os requisitos da ABNT NBR 16697:2018; calcário de alta pureza; placas fibrosas de polpa kraft branqueada de eucalipto comercial, fornecidas pela Klabin S.A.; baba de cupim sintética (BCS) disponibilizada pela BlindaSolo®; etileno-acetato de vinila (EVA) proveniente de emulsão aquosa industrial; além de água potável utilizada segundo a ABNT NBR 15900-1:2009.

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização química das fibras de polpa de eucalipto

A composição química das fibras de polpa de eucalipto utilizadas neste estudo foi obtida a partir dos resultados publicados por Batista *et al.* (2024), que empregaram o mesmo material utilizado na presente pesquisa. Segundo os autores, a composição química das fibras foi determinada por meio de metodologias padronizadas, incluindo normas TAPPI para determinação dos teores de extrativos, lignina e cinzas, além do método de Browning (1963) para determinação da holocelulose e do método proposto por Kennedy *et al.* (1987) para determinação da celulose. Os teores de hemiceluloses foram obtidos pela diferença entre os teores de holocelulose e celulose.

2.2.2 Caracterização física do EVA

O etileno-acetato de vinila (EVA) líquido foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas, incluindo densidade e teor de umidade, com o objetivo de avaliar características que podem influenciar sua interação com a matriz cimentícia. Os procedimentos experimentais foram realizados conforme metodologia adaptada de Yeon *et al.* (2019). A densidade foi determinada pelo método gravimétrico, utilizando balão volumétrico calibrado, enquanto o teor de umidade foi obtido por secagem em estufa até massa constante.

2.2.3 Caracterização térmica por análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG)

As análises termogravimétricas (TG) e de sua derivada (DTG) foram realizadas de acordo com a norma ASTM E1131-20 (2020) em um analisador termogravimétrico modelo Shimadzu DTG-60H, no Laboratório de Análises Térmicas da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As análises foram realizadas nas fibras de polpa de eucalipto, antes e após o tratamento das fibras com baba de cupim sintética (BCS), no EVA líquido e, posteriormente, nos compósitos cimentícios dos diferentes grupos experimentais, com o objetivo de caracterizar o comportamento térmico dos materiais e avaliar os efeitos do tratamento das fibras e da incorporação dos constituintes à matriz cimentícia.

Amostras com massa aproximada de 5 a 10 mg foram acondicionadas em cadinhos de alumina e submetidas a aquecimento contínuo da temperatura ambiente até 800 °C, à taxa de aquecimento de 10 °C·min⁻¹, sob atmosfera de nitrogênio.

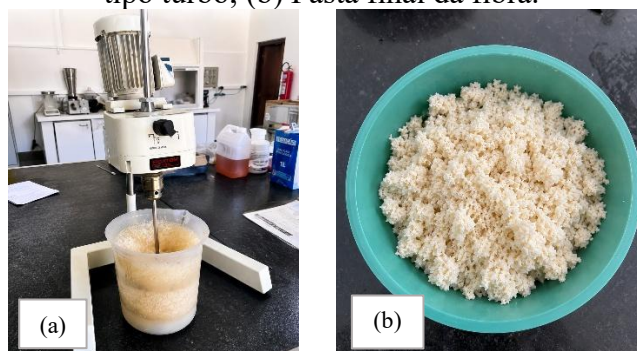
As curvas TG foram utilizadas para avaliar a variação de massa em função da temperatura, enquanto as curvas DTG foram empregadas para identificar os estágios de degradação térmica e as temperaturas características associadas aos diferentes processos de decomposição.

2.2.4 Produção do Fibrocimento

Inicialmente as placas fibrosas de polpa de eucalipto foram cortadas e dispersas em água por meio de agitação mecânica durante aproximadamente 15 minutos, até a formação de uma pasta homogênea. Para essa etapa, utilizou-se um misturador de hélice vertical do tipo turbo, com capacidade de 10 litros e controle de velocidade, pertencente ao Laboratório da UEPAM/UFLA.

Após a homogeneização, a pasta fibrosa foi vertida sobre uma peneira metálica de malha fina para a remoção do excesso de água, sendo posteriormente submetida à prensagem manual, a fim de acelerar a drenagem da umidade residual (Figura 1).

Figura 1 - Preparação das fibras de polpa de eucalipto: (a) misturador de hélice vertical do tipo turbo; (b) Pasta final da fibra.



Fonte: Autor (2026).

Na sequência, as fibras parcialmente desidratadas foram submetidas ao tratamento superficial por imersão durante 30 minutos em solução aquosa de baba de cupim sintética (BCS), preparada na proporção de 1 litro de água para 750 ml do produto, em relação volumétrica (v/v). A utilização da BCS na forma diluída seguiu as recomendações do fabricante (Blindasolo, 2024), que orienta sua dispersão em meio aquoso para garantir adequada homogeneização e interação com o substrato tratado.

Concluídas as etapas de preparo das fibras, procedeu-se à fabricação do fibrocimento, a qual foi conduzida por meio de duas extrusões sucessivas, organizadas em delineamento inteiramente casualizado. Em ambas as extrusões, empregou-se uma composição padronizada com massa total de 10 kg, contendo 70% de cimento, 25% de calcário e 5% de fibras, além dos aditivos HPMC e ADVA, aplicados na proporção de 1% em relação à massa de cimento, conforme suas especificações de uso, adotando-se proporções compatíveis com compósitos fibrocimentícios processados por extrusão descritos na literatura (Tonoli, 2009; Tonoli *et al.*, 2019). Para otimizar a homogeneização dos materiais, cada componente da mistura foi inicialmente pesado em metade da quantidade total prevista por extrusão, permitindo uma pré-mistura manual mais eficiente. Posteriormente, as porções foram reunidas e misturadas integralmente, seguindo as proporções apresentadas na Tabela 1. As misturas foram preparadas com relação água/cimento igual a 0,40.

Tabela 1 - Composição em massa (kg) dos materiais por extrusão

Extrusão	Cimento (massa)	Calcário (massa)	Fibra (massa)
1	7	2,5	0,5 (sem tratamento)
2	7	2,5	0,5 (tratada com BCS)

Fonte: Autor (2026).

Após a pré-mistura manual de todos os materiais, a argamassa foi homogeneizada em um agitador mecânico de alto torque, operando a 400 rpm por 10 minutos. Em seguida, cada lote foi processado em uma extrusora monorroscas Verdés, modelo 51, equipada com rosca de diâmetro 100/130 mm, comprimento de 673 mm e velocidade de rotação de 32 rpm (Figura 2). Ao todo, foram produzidos 48 corpos de prova de fibrocimento, com dimensões de 28 mm × 200 mm × 18 mm, distribuídos igualmente entre as duas extrusões. Após a moldagem, os compósitos foram identificados e acondicionados em sacos plásticos selados a vácuo e temperatura ambiente de $(23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C})$ até completarem 28 dias de cura.

Figura 2 - Processos de produção dos compósitos: (a) mistura manual dos materiais; (b) misturador mecânico dos materiais; (c) máquina extrusora; (d) corpos de prova extrudados; (e) corpos de prova selados a vácuo.



Fonte: Autor (2026).

2.2.5 Revestimento com EVA

Após sete dias de cura, foram separados doze corpos de prova sem fibra tratada e doze corpos de prova contendo fibras tratadas com BCS para a aplicação do revestimento com emulsão líquida de EVA (acetato de etileno e vinila). A aplicação foi realizada manualmente, por meio de pincelamento, assegurando cobertura uniforme em todas as faces dos compósitos.

Em seguida, os corpos de prova revestidos foram colocados em estufa de esterilização e secagem com circulação de ar forçada (marca Lucadema), localizada no laboratório da UEPAM/UFLA, equipada com controle digital de temperatura e previamente ajustada para 40

°C. Cada ciclo de secagem teve duração de 15 minutos, sendo o procedimento repetido três vezes consecutivas, com reaplicação da emulsão de EVA entre as etapas. Durante cada ciclo, os corpos de prova foram virados para garantir a secagem e a fixação homogênea do revestimento ao longo de toda a superfície.

Após o resfriamento, os corpos de prova foram identificados e novamente acondicionados em sacos plásticos selados a vácuo e temperatura ambiente de $(23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C})$ até completarem 28 dias de cura.

2.2.6 Propriedades Físicas

Com base no princípio de Arquimedes, foram determinados os valores de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) dos corpos de prova após 28 dias de cura. Os procedimentos experimentais seguiram as orientações da norma ASTM C948-81(2023).

Para cada grupo experimental, seis corpos de prova foram mantidos submersos em água destilada por 24 horas, à temperatura ambiente ($\sim 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Ao término desse período, registrou-se a massa imersa (M_i). Em seguida, as amostras foram retiradas da água, e a superfície externa foi suavemente enxugada com pano limpo e seco, permitindo a medição da massa úmida (M_u).

Posteriormente, os corpos de prova foram colocados em estufa com circulação de ar, operando a $100 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h, para determinação da massa seca (M_s).

As propriedades físicas foram então calculadas utilizando as Equações apresentadas:

$$\text{Absorção de água aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Densidade Aparente } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_s}{M_u - M_i} * d \quad (3)$$

Onde (d) é a densidade da água = 1 g/cm^3 ; (M_s) a massa seca; (M_i) a massa imersa; (M_u) a massa úmida.

2.2.7 Propriedades Mecânicas

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina universal de ensaios Time-Shijin (modelo WDW-20E), equipada com célula de carga de 20 kN. A resistência mecânica dos compósitos foi determinada por meio do ensaio de flexão estática em três pontos, utilizando vão de 135 mm e velocidade de carregamento de 1,5 mm/min. Esse procedimento permitiu calcular o módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e a tenacidade, em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 15498 (2012). Para cada grupo experimental, foram ensaiados seis corpos de prova, avaliados após 28 dias de cura.

As equações usadas para calcular as propriedades mecânicas estão apresentadas abaixo:

$$\text{Módulo de elasticidade} = \frac{(F2 - F1) * \text{vão}^3}{4 * (D2 - D1) * b * e^3} \quad (4)$$

$$\text{Módulo de ruptura} = \frac{3 * F_{\text{máx}} * \text{vão}}{2 * b * e^2} \quad (5)$$

$$\text{Tenacidade} = \frac{\text{Energia absorvida}}{a} \quad (6)$$

Onde ($F_{\text{máx}}$) é a força máxima; (b) é largura do corpo de prova; (e) é a espessura do corpo de prova; ($F1$) é a força obtida dentro do regime elástico e menor que a $F2$; ($F2$) é a força obtida dentro do regime elástico e maior que a $F1$; ($D1$) é a deformação obtida dentro do regime elástico e menor que a $D2$; ($D2$) é a deformação obtida dentro do regime elástico e maior que a $D1$; (Energia absorvida) é a energia na área sob a curva do gráfico, força x deformação; (a) é a área da seção transversal do corpo de prova.

2.2.8 Análise da condutividade térmica

O ensaio de condutividade térmica dos compósitos de fibrocimento foi conduzido com base nos procedimentos estabelecidos por (Batista *et al.*, 2024 e Terra *et al.*, 2023), tomando como referência adaptada a norma JIS 1412-2 (2016). Para a execução do teste, utilizou-se um sistema composto por duas câmaras térmicas dispostas verticalmente, ambas revestidas internamente com uma camada de poliestireno expandido (EPS) e, em nível mais interno, por uma manta térmica refletiva.

O desempenho térmico dos compósitos foi avaliado após 28 dias de cura. Durante o ensaio, três amostras de cada grupo experimental foram submetidas ao aquecimento gradual proveniente de uma fonte radiante posicionada na parte superior do aparato experimental. A temperatura dos corpos de prova foi monitorada continuamente até a estabilização térmica. As leituras foram registradas tanto na superfície diretamente exposta à radiação quanto na face oposta, possibilitando a determinação do gradiente térmico através da espessura do material.

Com base nos valores registrados durante o ensaio e considerando a espessura média de cada corpo de prova, a condutividade térmica dos compósitos foi determinada por meio da Equação 7.

$$k = \frac{P \cdot E}{\Delta T} \quad (7)$$

Onde o (K) representa a condutividade térmica do material [$W/m \cdot K$]; (P) corresponde ao fluxo de radiação incidente por unidade de área [$200 W/m^2$]; (E) é a espessura do corpo de prova [m]; (ΔT) refere-se à diferença de temperatura registrada entre as faces exposta e não exposta durante o ensaio [$^{\circ}C$].

2.2.9 Análises Microestruturais

A caracterização microestrutural dos compósitos foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para cada grupo experimental, foi selecionado um corpo de prova, sempre na região correspondente à fratura obtida no ensaio de flexão estática, visando à análise da morfologia da ruptura e da interface entre a matriz cimentícia e as fibras.

Os fragmentos destinados à análise foram retirados diretamente da zona de fratura e preparados com dimensões aproximadas de 1 cm³. Em seguida, foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar forçada, a 100 °C por 24 h, para eliminação da umidade residual. Após a secagem, as amostras foram fixadas em suportes de alumínio (*stubs*) utilizando fita condutiva de carbono.

Nas primeiras análises, as amostras foram recobertas com uma fina camada de carbono e analisadas em microscópio eletrônico de varredura LEO EVO 40 XVP (Carl Zeiss), pertencente ao Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), utilizando detector de elétrons secundários (SE1) e tensão de aceleração de 20,06 kV. Nas análises posteriores, as amostras foram metalizadas com ouro em evaporador SCD 050 (Bal-Tec) e analisadas em microscópio eletrônico de varredura CLARA STEM-FEG (TESCAN),

pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME) da UFLA, utilizando detector ET e tensão de aceleração de 20 kV.

2.2.10 Envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado dos compósitos de fibrocimento foi conduzido com base em procedimentos amplamente utilizados na literatura, conforme descrito por Savastano Junior *et al.* (2005), Tonoli *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2025), visando simular condições cíclicas de umedecimento e secagem, que promovem a degradação progressiva da interface fibra-matriz.

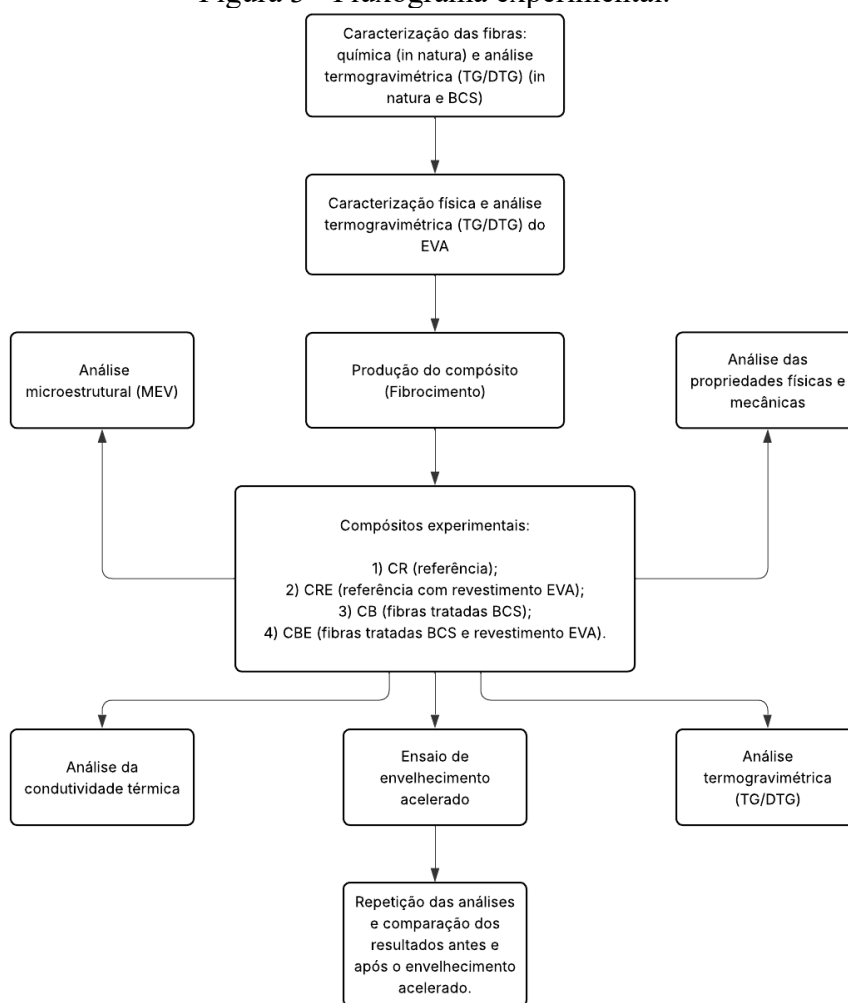
Para isso, seis corpos de prova de cada compósito experimental foram submetidos a 60 ciclos de envelhecimento, sendo cada ciclo composto por 18 horas de imersão em água, seguidas de 6 horas de secagem em estufa a 60 °C. O procedimento foi realizado nas dependências da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.3 Análise dos resultados

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, constituído por quatro grupos experimentais, cada um composto por doze corpos de prova: CR (compósito de referência), CRE (compósito de referência com revestimento em EVA), CB (compósito com fibras tratadas com baba de cupim sintética) e CBE (compósito com fibras tratadas com baba de cupim sintética e revestimento em EVA). As análises abrangeram a caracterização das fibras de polpa de eucalipto e do EVA líquido, bem como as avaliações físicas, mecânicas, de condutividade térmica, termogravimétricas (TG/DTG), e microestruturais dos compósitos, permitindo avaliar os efeitos do tratamento das fibras, da aplicação do revestimento e do envelhecimento acelerado sobre o desempenho dos materiais.

A Figura 3 apresenta o fluxograma do delineamento experimental da pesquisa, sintetizando as etapas desenvolvidas.

Figura 3 - Fluxograma experimental.



Fonte: Autor (2026).

Os resultados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando as comparações entre os diferentes compósitos e entre as condições sem e com envelhecimento acelerado. Quando observadas diferenças significativas ($p < 0,05$), as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, utilizando-se o software SISVAR.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise química e termogravimétrica (TG/DTG) das fibras

Os resultados da composição química das fibras apresentados na Tabela 2, obtidos por Batista *et al.* (2024) utilizando o mesmo lote de fibras empregado na presente pesquisa,

evidenciaram elevada predominância de holocelulose, com teor de 94,8%, constituída principalmente por celulose, com 79,1%, e hemiceluloses, com 15,7%. Por outro lado, foram observados baixos teores de lignina, de 0,4%, e de cinzas, de 0,05%, características típicas de fibras de polpa kraft branqueada de eucalipto submetidas a processos de deslignificação e branqueamento (Batista *et al.*, 2024).

O elevado teor de holocelulose indica alta concentração de carboidratos estruturais, condição favorável para aplicações em compósitos cimentícios, uma vez que a celulose e as hemiceluloses contribuem para as propriedades mecânicas e para a capacidade de reforço das fibras (Savastano Junior *et al.*, 2005; Tonoli *et al.*, 2019). Segundo Ramos *et al.* (2024), elevados teores de componentes celulósicos estão associados ao bom desempenho físico e mecânico de materiais lignocelulósicos empregados como reforço em matrizes cimentícias.

O baixo teor de lignina observado está de acordo com os valores reportados para polpas kraft branqueadas comerciais de eucalipto, indicando elevada eficiência do processo de deslignificação. Além disso, baixos teores de lignina podem favorecer a fibrilação e a dispersão das fibras na matriz cimentícia, contribuindo para melhor interação entre os constituintes do compósito (Batista *et al.*, 2024).

Adicionalmente, o reduzido teor de cinzas indica baixa presença de materiais inorgânicos e impurezas minerais, característica desejável para aplicações industriais e para a produção de materiais celulósicos de elevada pureza (Tonoli *et al.*, 2019).

Tabela 2 - Composição química das fibras.

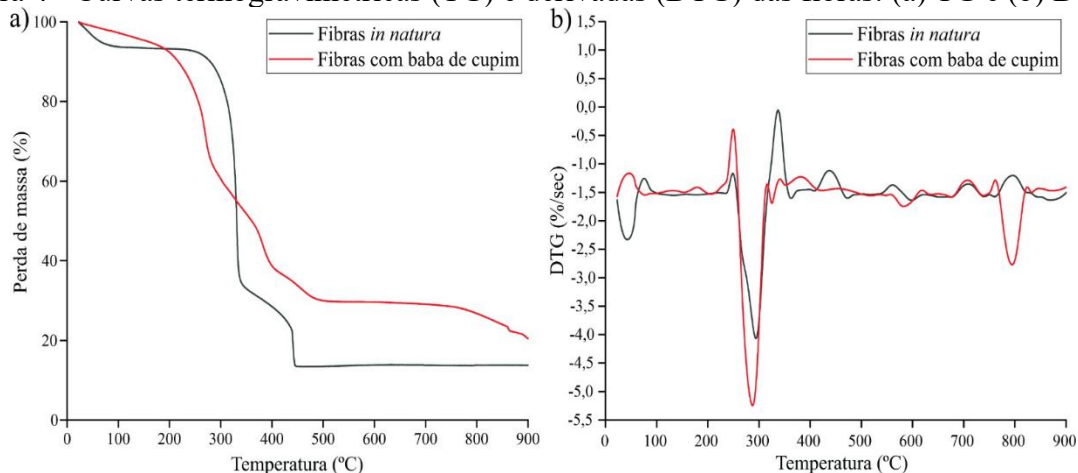
Análises	Fibras comerciais de polpa kraft branqueada de eucalipto	
	(% de média em massa)	
Extrativos totais	-	
Lignina	0,4 ($\pm$ 0,1)	
Holocelulose	94,8 ($\pm$ 0,2)	
Celulose	79,1 ($\pm$ 0,3)	
Hemiceluloses	(15,7 $\pm$ 0,1)	
Cinzas	0,05 ($\pm$ 0,01)	

Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Batista *et al.* (2024).

As curvas termogravimétricas (TG) e suas derivadas (DTG) das fibras de eucalipto *in natura* e tratadas com baba de cupim sintética são apresentadas na Figura 4. Ambas as amostras apresentaram comportamento térmico característico de materiais lignocelulósicos, com diferentes etapas de perda de massa associadas à eliminação da umidade e à decomposição dos principais constituintes da parede celular vegetal.

Figura 4 - Curvas termogravimétricas (TG) e derivadas (DTG) das fibras: (a) TG e (b) DTG.



Fonte: Autor (2026).

Na curva TG (Figura 4a), observa-se uma primeira perda de massa em temperaturas inferiores a aproximadamente 120 °C, atribuída à evaporação da água livre e da água fisicamente adsorvida pelas fibras. Segundo Yang *et al.* (2007), essa etapa corresponde à eliminação da umidade sem provocar alterações significativas na estrutura química do material.

A principal perda de massa ocorreu entre aproximadamente 250 e 400 °C, sendo atribuída à degradação da hemicelulose e, principalmente, da celulose. Conforme descrito por Poletto *et al.* (2012), a hemicelulose apresenta menor estabilidade térmica devido à sua estrutura amorfa, iniciando sua degradação em temperaturas inferiores às da celulose, enquanto esta sofre decomposição em temperaturas mais elevadas. A lignina apresenta degradação gradual em uma ampla faixa de temperatura, aproximadamente entre 200 e 600 °C, em razão da elevada complexidade de sua estrutura química (Tonoli *et al.*, 2019 e Ramos *et al.*, 2024).

A comparação entre as curvas TG evidencia que as fibras tratadas com baba de cupim sintética apresentaram degradação distribuída em uma faixa de temperatura mais ampla e maior massa residual ao final do ensaio quando comparadas às fibras *in natura*. Esse comportamento sugere que o tratamento promoveu modificações na superfície das fibras, possivelmente pela deposição de compostos provenientes da baba de cupim sintética, favorecendo a formação de resíduo carbonáceo durante a degradação térmica (Yang *et al.*, 2007; Tonoli *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2024).

As curvas DTG (Figura 4b) corroboram esse comportamento, evidenciando que ambas as fibras apresentaram o principal pico de degradação na região correspondente à decomposição da celulose. Entretanto, as fibras tratadas apresentaram maior intensidade do pico principal e

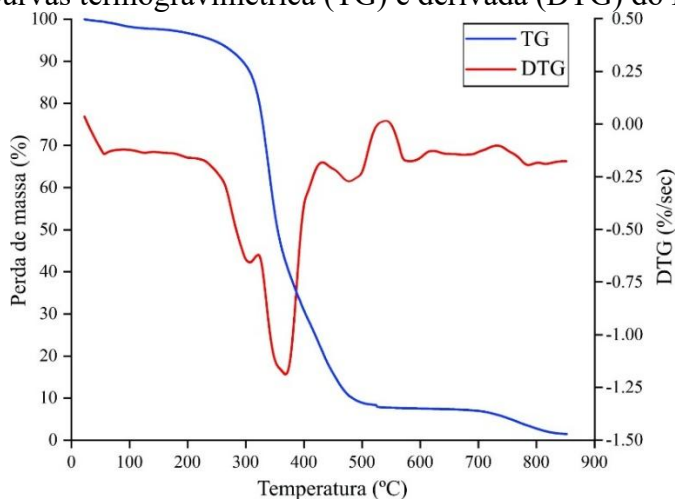
um perfil de degradação distribuído em uma faixa de temperatura mais ampla. Além disso, observa-se um evento térmico adicional entre aproximadamente 760 e 800 °C apenas nas fibras tratadas, sugerindo a presença de resíduos com maior estabilidade térmica associados ao tratamento (Savastano Junior *et al.*, 2005 e Tonoli *et al.*, 2019).

3.2 Análise física e termogravimétrica (TG/DTG) do EVA

O EVA líquido apresentou densidade média de $1,06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e teor de umidade de 63%, características compatíveis com dispersões poliméricas aquosas. Esses parâmetros indicam elevada fração líquida do material, influenciando diretamente sua aplicação em matrizes cimentícias, especialmente durante as etapas iniciais de aplicação e secagem (Hewlett; Liska, 2019; Kabir *et al.*, 2012). Além disso, o elevado teor de umidade pode favorecer a formação do filme polimérico após a secagem e potencialmente influenciar a distribuição do revestimento sobre as fibras e a interação entre os constituintes do compósito (Yeon *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2025).

A análise termogravimétrica (TG) e a termogravimetria derivada (DTG) do EVA líquido (Figura 5) evidenciam um comportamento térmico típico de copolímeros dessa natureza, com diferentes estágios de degradação ao longo do aquecimento. A curva TG indica que o material permanece termicamente estável até aproximadamente 280 °C, com perdas iniciais pouco significativas, associadas principalmente à eliminação de umidade residual e de voláteis superficiais. A partir de cerca de 300 °C observa-se uma redução acentuada da massa, caracterizando o início da degradação térmica do polímero.

Figura 5 - Curvas termogravimétrica (TG) e derivada (DTG) do EVA.



Fonte: Autor (2026).

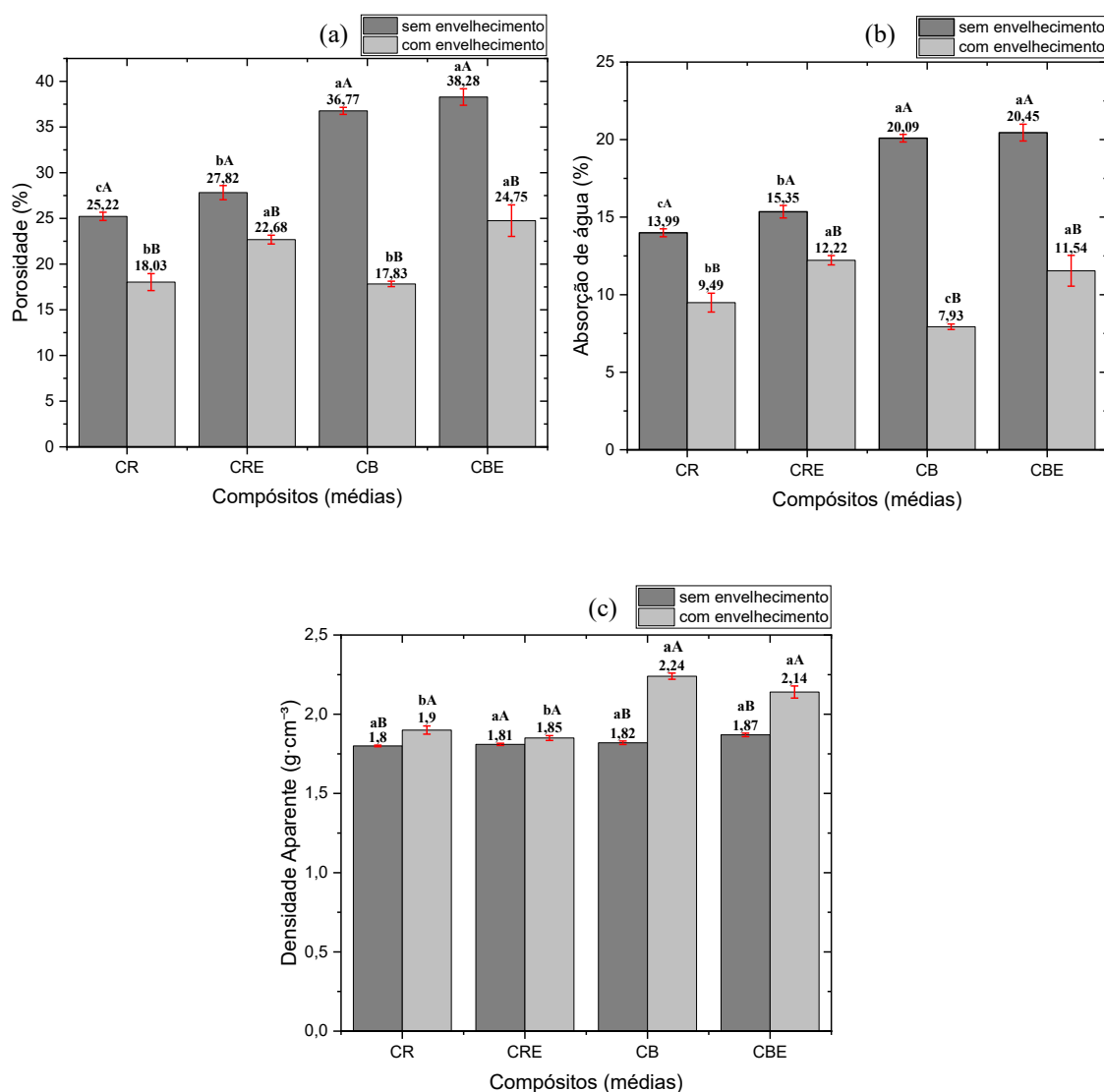
A curva DTG evidencia dois eventos principais. O primeiro, mais intenso, ocorre na faixa aproximada de 330–380 °C e está associado à desacetilação do copolímero, ou seja, à liberação de grupos acetato sob a forma de ácido acético. O segundo evento, mais amplo, entre cerca de 420 e 520 °C, relaciona-se à degradação da cadeia polimérica remanescente, rica em etileno. Esses mecanismos são característicos do EVA e já foram descritos em estudos clássicos de degradação térmica desse copolímero, nos quais a decomposição ocorre em duas etapas bem definidas: inicialmente a eliminação dos grupos acetato, seguida pela ruptura da cadeia principal do polímero (Yeon *et al.*, 2019; Kabir *et al.*, 2012 e Li *et al.*, 2025).

Os eventos térmicos observados confirmam que o EVA apresenta estabilidade muito superior às temperaturas envolvidas nos processos de fabricação, cura e uso do fibrocimento, que usualmente não ultrapassam 100 °C, indicando sua compatibilidade térmica para aplicação como revestimento em compósitos cimentícios (Li *et al.*, 2025).

3.3 Análise das propriedades físicas dos compósitos

A Figura 6 apresenta os resultados de porosidade aparente (PA), absorção de água (AA) e densidade aparente (DA) dos compósitos de fibrocimento nas condições sem e com envelhecimento acelerado. De modo geral, o envelhecimento promoveu redução significativa da porosidade e da absorção de água, acompanhada pelo aumento da densidade aparente na maioria dos grupos experimentais. Esse comportamento pode ser atribuído à continuidade das reações de hidratação do cimento durante os ciclos de imersão e secagem, favorecendo a formação e precipitação de produtos hidratados, principalmente gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), no interior dos poros da matriz cimentícia (Savastano Junior *et al.*, 2005; Tonoli *et al.*, 2019; Xaysombath *et al.*, 2025). Como consequência, ocorre o refinamento da microestrutura, redução dos espaços vazios acessíveis à água e maior compactação da matriz, refletindo no aumento da densidade aparente dos compósitos (Mehmood *et al.*, 2025; Silva Neto *et al.*, 2025).

Figura 6 - Valores médios $\pm$ desvio padrão das propriedades físicas dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado: (a) porosidade; (b) absorção de água; (c) densidade aparente.



Legenda: CR: Compósito de referência; CRE: Compósito de referência com revestimento em EVA; CB: Compósito com fibras tratadas com BCS; CBE: Compósito com fibras tratadas com BCS e revestimento em EVA.

Médias seguidas por letras minúsculas distintas diferem entre os compósitos, e letras maiúsculas distintas diferem entre as condições de envelhecimento para um mesmo compósito, pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autor (2026).

Os compósitos de referência (CR) apresentaram redução significativa da porosidade aparente, de 25,22% para 18,03%, acompanhada pela diminuição da absorção de água, de 13,99% para 9,49%, e aumento significativo da densidade aparente de 1,80 para 1,90 g·cm⁻³ após o envelhecimento acelerado. Esses resultados evidenciam o refinamento da microestrutura e maior compactação da matriz cimentícia, decorrentes da continuidade das reações de

hidratação e do preenchimento dos vazios por produtos hidratados, reduzindo a acessibilidade da água ao interior do compósito (Tonoli *et al.*, 2019; Mehmood *et al.*, 2025; Silva Neto *et al.*, 2025).

Para os compósitos de referência revestidos com EVA (CRE), observou-se redução significativa da porosidade aparente, de 27,82% para 22,06%, e da absorção de água, de 15,35% para 12,22%, enquanto a densidade aparente apresentou ligeiro aumento, passando de 1,81 para 1,85 g·cm⁻³, sem diferença estatística entre as condições sem e com envelhecimento. Esses resultados sugerem que o revestimento com EVA contribuiu para alterações na estrutura porosa e na permeabilidade do material, porém sem promover aumento expressivo da compactação interna. Segundo Li *et al.* (2025), modificações poliméricas em matrizes cimentícias podem alterar a distribuição dos poros e influenciar a absorção de água dos compósitos.

Os compósitos com fibras tratadas com baba de cupim sintética (CB) apresentaram as alterações mais pronunciadas após o envelhecimento acelerado, com redução significativa da porosidade aparente de 36,77% para 17,83%, diminuição da absorção de água de 20,09% para 7,93% e aumento da densidade aparente de 1,82 para 2,24 g·cm⁻³. Embora o grupo CB tenha apresentado maior porosidade inicial em relação ao grupo de referência, após o envelhecimento os valores de porosidade tornaram-se estatisticamente semelhantes aos observados para o CR. Esse comportamento sugere que a elevada porosidade inicial proporcionou maior disponibilidade de espaços vazios para o preenchimento por produtos de hidratação formados durante os ciclos de envelhecimento, promovendo expressiva densificação da matriz cimentícia. Além disso, modificações na interface fibra-matriz decorrentes do tratamento com baba de cupim sintética podem ter favorecido a precipitação desses produtos hidratados, contribuindo para a reorganização microestrutural do compósito (Correia *et al.*, 2018; Tonoli *et al.*, 2019).

Os compósitos com fibra tratada com baba de cupim sintética e revestidos com EVA (CBE) também apresentaram redução significativa da porosidade aparente, de 38,28% para 24,75%, e da absorção de água, de 20,45% para 11,54%, associadas ao aumento da densidade aparente de 1,87 para 2,14 g·cm⁻³. Apesar dessas alterações, os valores de porosidade e absorção de água permaneceram relativamente elevados em comparação aos grupos CR e CB após o envelhecimento acelerado, indicando que a associação entre o tratamento das fibras e o revestimento polimérico não promoveu o mesmo grau de densificação observado nesses compósitos. Esse comportamento pode estar relacionado à influência do EVA na distribuição dos poros e na reorganização da microestrutura, interferindo na formação e precipitação dos

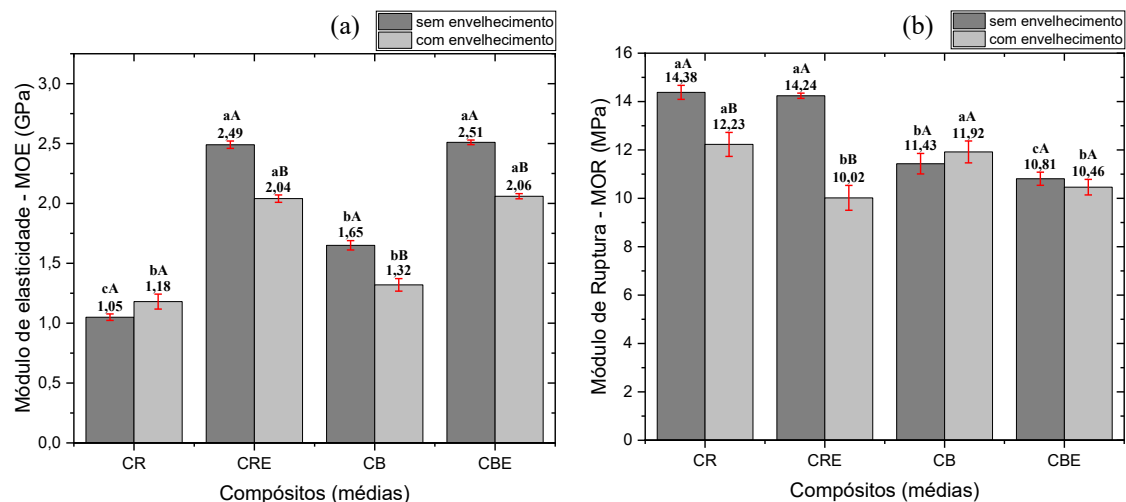
produtos de hidratação durante o envelhecimento (Bomediano, Gomes e Fontanini, 2020; Li *et al.*, 2025).

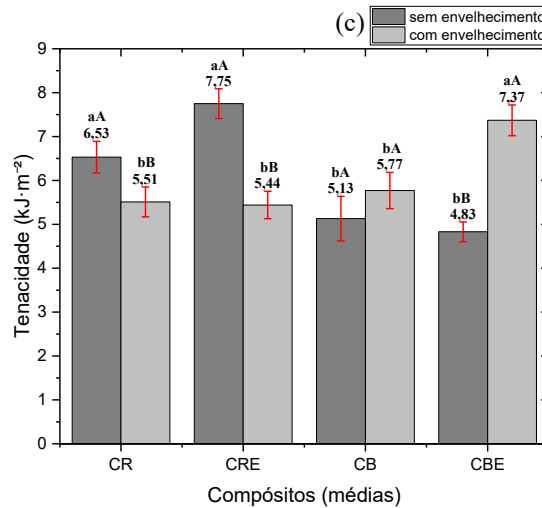
Apesar das alterações observadas, todos os compósitos apresentaram valores de absorção de água inferiores a 35%, atendendo ao limite estabelecido pela ABNT NBR 15498 (2012) para produtos de fibrocimento.

3.4 Análise das propriedades mecânicas dos compósitos

A Figura 7 apresenta os resultados do módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e tenacidade dos compósitos de fibrocimento nas condições sem e com envelhecimento acelerado, enquanto a Figura 8 apresenta as curvas força $\times$ deformação obtidas nos ensaios de flexão. Os resultados demonstram que o envelhecimento acelerado promoveu respostas mecânicas distintas em função das modificações aplicadas aos compósitos. Segundo Savastano Junior *et al.* (2005), Tonoli *et al.* (2019) e Xaysombath *et al.* (2025), o desempenho mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais está diretamente relacionado à microestrutura da matriz, à porosidade, à integridade das fibras e à qualidade da interface fibra-matriz, fatores que controlam os mecanismos de propagação de fissuras e dissipação de energia.

Figura 7 - Valores médios $\pm$ desvio padrão das propriedades mecânicas dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado: (a) módulo de elasticidade; (b) módulo de ruptura; (c) tenacidade.



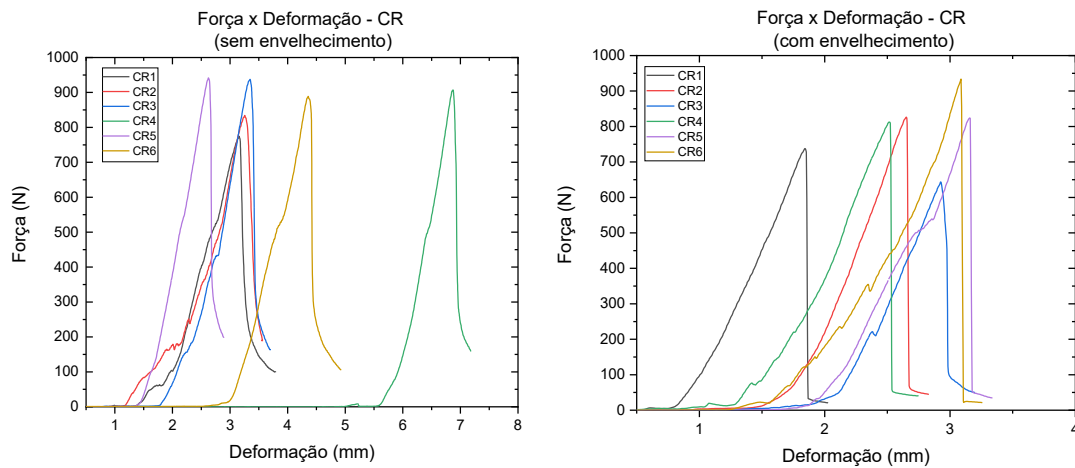


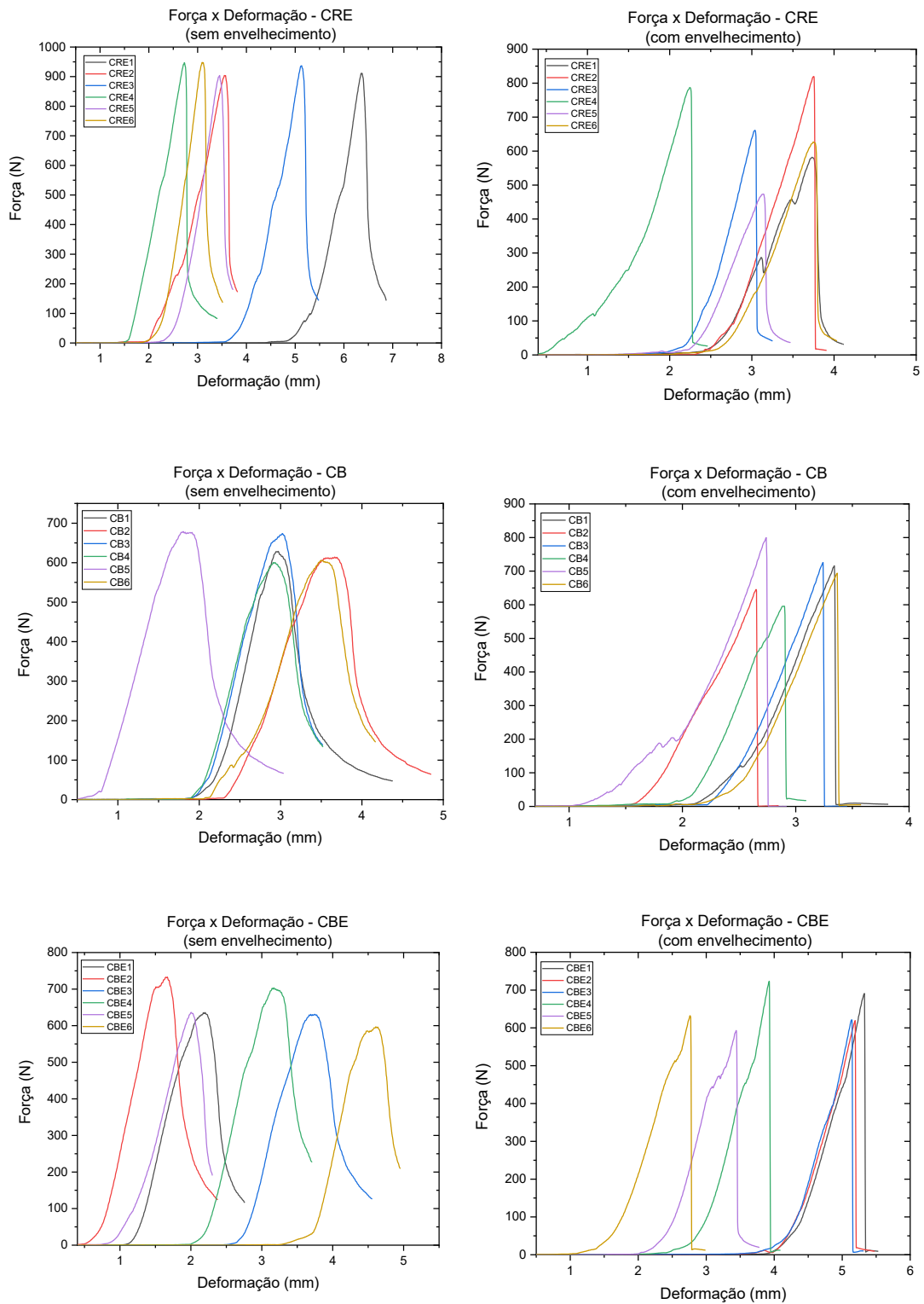
Legenda: CR: Compósito de referência; CRE: Compósito de referência com revestimento em EVA; CB: Compósito com fibras tratadas com BCS; CBE: Compósito com fibras tratadas com BCS e revestimento em EVA.

Médias seguidas por letras minúsculas distintas diferem entre os compostos, e letras maiúsculas distintas diferem entre as condições de envelhecimento para um mesmo composto, pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autor (2026).

Figura 8 - Curvas força $\times$ deformação dos compostos antes e após o envelhecimento acelerado.





Legenda: CR: Compósito de referência; CRE: Compósito de referência com revestimento em EVA; CB: Compósito com fibras tratadas com BCS; CBE: Compósito com fibras tratadas com BCS e revestimento em EVA.

Fonte: Autor (2026).

Os compósitos de referência (CR) apresentaram aumento significativo do MOE, de 1,05 para 1,18 GPa, acompanhado por reduções significativas do MOR, de 14,38 para 12,23 MPa, e da tenacidade, de 6,53 para 5,51 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ após o envelhecimento acelerado. As curvas força $\times$ deformação evidenciam menor capacidade de deformação e ruptura mais abrupta após o envelhecimento, comportamento associado à maior compactação da matriz cimentícia observada nos ensaios físicos. A redução da porosidade e o aumento da densidade aparente promoveram uma matriz mais rígida, justificando o aumento do MOE; entretanto, essa maior compactação reduziu os mecanismos de absorção de energia relacionados ao arrancamento das fibras e à propagação estável de fissuras, resultando na redução do MOR e da tenacidade (Savastano Junior *et al.*, 2005; Tonoli *et al.*, 2019).

Para os compósitos de referência revestidos com EVA (CRE), observou-se redução significativa do MOE, de 2,49 para 2,04 GPa, do MOR, de 14,24 para 10,02 MPa, e da tenacidade, de 7,75 para 5,44 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ após o envelhecimento acelerado. As curvas força $\times$ deformação indicam menor deformabilidade e menor capacidade de absorção de energia. Embora os resultados físicos tenham evidenciado redução da porosidade e absorção de água, o revestimento polimérico pode ter alterado a interação entre matriz e fibras, reduzindo a eficiência da transferência de tensões. Além disso, possíveis alterações na zona de transição fibra-matriz e a mineralização parcial das fibras podem ter contribuído para a redução da rigidez e da resistência mecânica após o envelhecimento (Bomediano, Gomes e Fontanini, 2020; Li *et al.*, 2025).

Os compósitos com fibras tratadas com baba de cupim sintética (CB) apresentaram redução significativa do MOE, de 1,65 para 1,32 GPa. Entretanto, o MOR e a tenacidade não diferiram estatisticamente entre as condições sem e com envelhecimento acelerado, apresentando valores de 11,43 e 11,92 MPa para MOR e de 5,13 e 5,77 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ para tenacidade, respectivamente. Esse resultado é particularmente relevante, uma vez que o grupo CB apresentou as alterações físicas mais pronunciadas, caracterizadas pela expressiva redução da porosidade e absorção de água, acompanhadas pelo aumento da densidade aparente. Esses resultados sugerem refinamento da microestrutura e possível melhoria da interface fibra-matriz, favorecendo a transferência de tensões e minimizando as perdas de resistência mecânica normalmente observadas após o envelhecimento. A manutenção do MOR indica que a modificação promovida pela baba de cupim sintética pode ter contribuído para preservar os mecanismos de reforço, mesmo diante da maior compactação da matriz. Por outro lado, a redução do MOE sugere que, embora a matriz tenha se tornado mais densa, possíveis alterações

na integridade das fibras e na zona de transição fibra-matriz podem ter reduzido a rigidez global do compósito (Tonoli *et al.*, 2019; Xaysombath *et al.*, 2025).

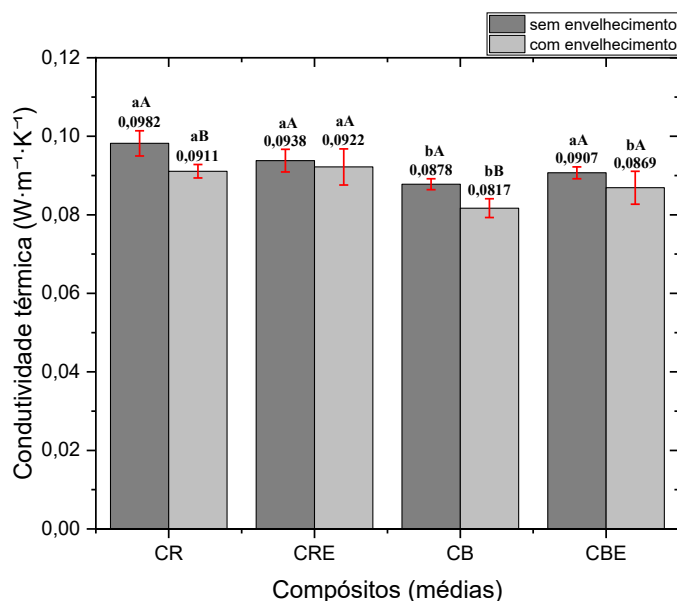
Os compósitos com fibras tratadas com baba de cupim sintética e revestidos com EVA (CBE) apresentaram redução significativa do MOE, de 2,51 para 2,06 GPa, enquanto o MOR não diferiu estatisticamente após o envelhecimento acelerado, apresentando valores de 10,81 e 10,46 MPa para as condições sem e com envelhecimento, respectivamente. Em contrapartida, a tenacidade aumentou significativamente, passando de 4,83 para 7,37 kJ·m⁻². As curvas força × deformação evidenciam maior deslocamento na ruptura e aumento da área sob a curva após o envelhecimento, indicando maior capacidade de dissipação de energia. Esse comportamento sugere que a combinação entre o tratamento das fibras com baba de cupim sintética e o revestimento com EVA favoreceu mecanismos relacionados ao arrancamento das fibras e à propagação mais estável das fissuras. Embora o envelhecimento tenha promovido o refinamento da microestrutura e o aumento da densidade aparente, a presença do EVA pode ter contribuído para tornar a interface fibra-matriz mais deformável, retardando a ruptura frágil e aumentando a energia absorvida pelo material durante o carregamento (Bomediano, Gomes e Fontanini, 2020; Li *et al.*, 2025).

Apesar das reduções observadas em alguns grupos, todos os compósitos apresentaram valores de MOR superiores a 4 MPa, atendendo aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 15498 (2012) para produtos de fibrocimento.

3.5 Análise da condutividade térmica dos compósitos

A Figura 9 apresenta os valores de condutividade térmica dos compósitos de fibrocimento nas condições sem e com envelhecimento acelerado. De modo geral, os compósitos contendo fibras tratadas com baba de cupim sintética apresentaram os menores valores de condutividade térmica, evidenciando maior potencial de isolamento térmico em comparação aos grupos de referência. Segundo Savastano Junior *et al.* (2005) e Tonoli *et al.* (2009), a transferência de calor em compósitos cimentícios depende não apenas da densidade do material, mas também da estrutura porosa, da distribuição dos vazios e da resistência térmica nas interfaces entre os constituintes.

Figura 9 - Valores médios $\pm$ desvio padrão de condutividade térmica dos compósitos antes e após envelhecimento acelerado.



Legenda: CR: Compósito de referência; CRE: Compósito de referência com revestimento em EVA; CB: Compósito com fibras tratadas com BCS; CBE: Compósito com fibras tratadas com BCS e revestimento em EVA.

Médias seguidas por letras minúsculas distintas diferem entre os compósitos, e letras maiúsculas distintas diferem entre as condições de envelhecimento para um mesmo compósito, pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autor (2026).

Os compósitos de referência (CR) apresentaram redução da condutividade térmica de 0,0982 para 0,0911 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ após o envelhecimento acelerado, enquanto os compósitos revestidos com EVA (CRE) apresentaram pequena redução, de 0,0938 para 0,0922 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, sem diferenças estatísticas significativas entre as condições avaliadas. Esses resultados indicam que o envelhecimento exerceu influência limitada sobre o comportamento térmico desses grupos.

Os compósitos com fibras tratadas com baba de cupim sintética (CB) apresentaram os menores valores de condutividade térmica entre todos os tratamentos, passando de 0,0878 para 0,0817 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ após o envelhecimento acelerado. Esse comportamento sugere que o tratamento das fibras promoveu alterações na interface fibra-matriz, aumentando a resistência térmica interfacial e dificultando a propagação do fluxo de calor. Além disso, o refinamento microestrutural observado nos ensaios físicos pode ter contribuído para uma distribuição mais eficiente das descontinuidades internas, aumentando a resistência à transferência de calor (Liu e Lv, 2021; Tonoli *et al.*, 2010).

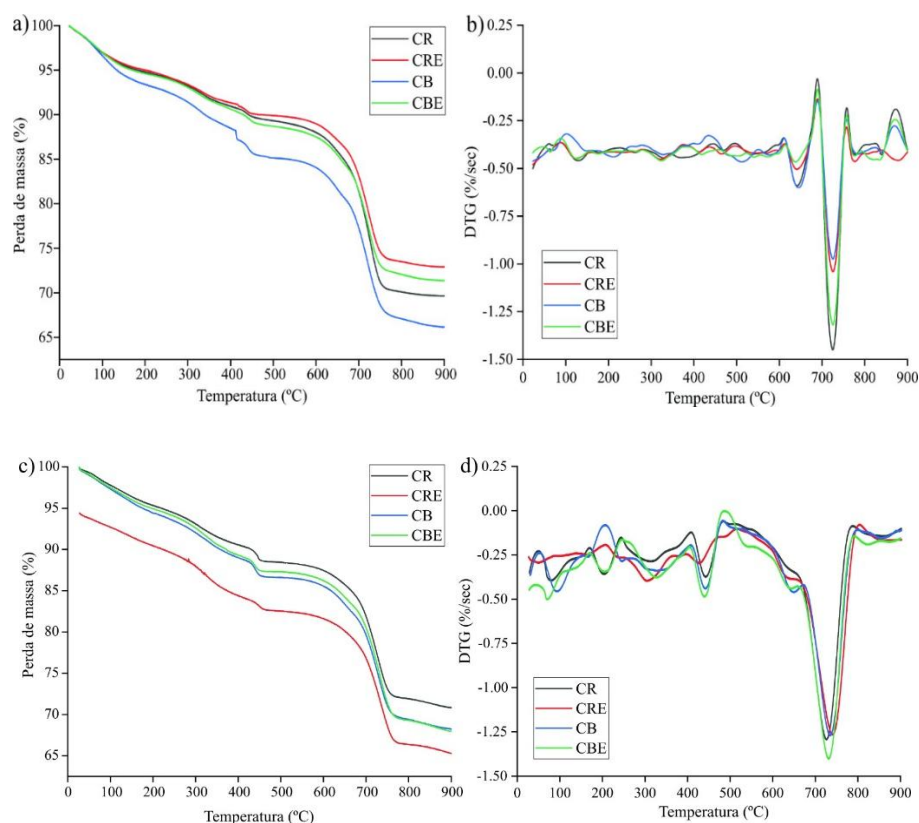
Para os compósitos com fibras tratadas com baba de cupim sintética e revestidos com EVA (CBE), observou-se redução da condutividade térmica de $0,0907$ para $0,0869 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ após o envelhecimento acelerado. Embora o EVA apresente baixa condutividade térmica, os valores obtidos permaneceram superiores aos observados para o grupo CB. Esse comportamento sugere que a incorporação do revestimento polimérico promoveu alterações na organização microestrutural e na continuidade das fases sólidas do compósito, reduzindo parcialmente a resistência térmica interfacial proporcionada pelo tratamento das fibras com a BCS (Mehmood *et al.*, 2025).

Embora o envelhecimento tenha promovido aumento da densidade aparente dos compósitos, observou-se redução da condutividade térmica na maioria dos tratamentos. Esse resultado demonstra que, em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, a transferência de calor não depende exclusivamente da densidade do material, sendo fortemente influenciada pela distribuição dos poros, pelas interfaces entre os constituintes e pela continuidade das fases condutoras. O refinamento microestrutural promovido pelo envelhecimento pode ter aumentado a resistência térmica interna do sistema, contribuindo para a redução da propagação do calor (Li *et al.*, 2025 e Tonoli *et al.*, 2010).

3.6 Análise termogravimétrica (TG/DTG) dos compósitos

As curvas termogravimétricas (TG) e suas derivadas (DTG) dos compósitos experimentais, antes e após o envelhecimento acelerado, são apresentadas na Figura 10. De modo geral, todos os compósitos apresentaram comportamento térmico semelhante, evidenciando que o tratamento das fibras com baba de cupim sintética e a aplicação do revestimento de EVA não alteraram significativamente os mecanismos de decomposição térmica do material.

Figura 10 - Curvas termogravimétricas (TG) e derivadas (DTG) dos compósitos experimentais: (a) TG e (b) DTG antes do envelhecimento acelerado; (c) TG e (d) DTG após o envelhecimento acelerado.



Fonte: Autor (2026).

Nas curvas TG dos compósitos sem envelhecimento acelerado (Figura 10a), observa-se uma primeira perda de massa em temperaturas inferiores a aproximadamente 120 °C, atribuída à evaporação da água livre e da água fisicamente adsorvida na matriz cimentícia. Segundo Yang *et al.* (2007), essa etapa corresponde à eliminação da umidade sem alterações significativas na estrutura química dos constituintes do material.

Entre aproximadamente 200 e 400 °C ocorre uma perda gradual de massa associada à degradação dos componentes lignocelulósicos das fibras. De acordo com Poletto *et al.* (2012), a hemicelulose apresenta menor estabilidade térmica, degradando-se inicialmente, seguida pela celulose, enquanto a lignina sofre decomposição lenta em uma ampla faixa de temperatura, aproximadamente entre 200 e 600 °C. Observa-se ainda uma pequena inflexão entre aproximadamente 430 e 500 °C, atribuída à desidroxilação da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), um dos principais produtos de hidratação do cimento Portland (Tonoli *et al.*, 2019).

A principal perda de massa ocorreu entre aproximadamente 680 e 760 °C, sendo atribuída à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), proveniente tanto do filler calcário

incorporado à mistura quanto da carbonatação da matriz cimentícia, com formação de óxido de cálcio (CaO) e liberação de dióxido de carbono (CO₂) (Yang *et al.*, 2007; Tonoli *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2024).

Comparando os tratamentos antes do envelhecimento acelerado, verifica-se que os compósitos CR, CRE e CBE apresentaram comportamento bastante semelhante durante todo o aquecimento, mantendo perfis praticamente sobrepostos. Em contrapartida, o compósito CB apresentou maior perda de massa ao final do ensaio, resultando em menor massa residual. Esse comportamento sugere que o tratamento das fibras com baba de cupim sintética, sem a proteção adicional do revestimento de EVA, pode ter favorecido maior perda de massa da fração orgânica do compósito durante o aquecimento. Entretanto, como as temperaturas dos principais eventos térmicos permaneceram praticamente inalteradas entre os tratamentos, observa-se que o tratamento das fibras não alterou significativamente a estabilidade térmica global do material.

Após o envelhecimento acelerado (Figura 10c), todas as formulações mantiveram os mesmos eventos de decomposição observados antes do envelhecimento, indicando que os mecanismos de degradação térmica permaneceram preservados. Entretanto, diferenças na massa residual tornam-se mais evidentes entre os tratamentos.

O compósito CRE apresentou a menor massa residual ao final do ensaio, indicando maior perda de massa durante o aquecimento quando comparado aos demais tratamentos. Esse comportamento pode estar associado à presença do revestimento de EVA, uma vez que materiais à base de etileno-acetato de vinila apresentam degradação térmica em faixas intermediárias de temperatura. Além disso, os ciclos de envelhecimento acelerado podem ter promovido alterações estruturais no revestimento polimérico, favorecendo a perda de componentes voláteis e reduzindo a massa residual do compósito (Tonoli *et al.*, 2019).

Por outro lado, os compósitos CR, CB e CBE apresentaram comportamento bastante semelhante entre si, mantendo valores de massa residual superior ao do tratamento CRE. Essas diferenças podem estar relacionadas, entre outros fatores, às alterações microestruturais promovidas pelo envelhecimento acelerado, como carbonatação, redistribuição da água nos poros e modificações na interface fibra-matriz, fenômenos frequentemente observados em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais (Savastano Junior *et al.*, 2005 e Tonoli *et al.*, 2019).

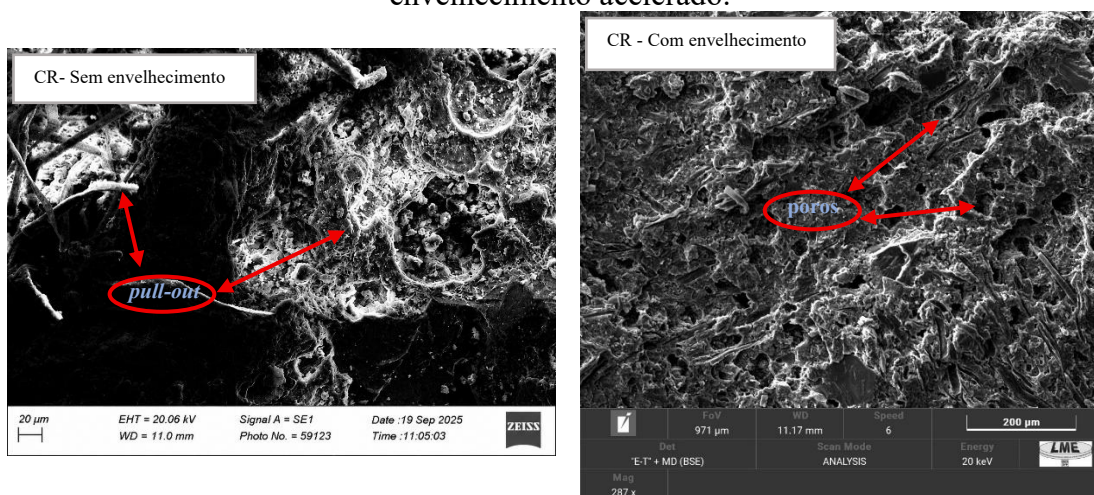
As curvas DTG antes do envelhecimento acelerado (Figura 10b) evidenciaram que o principal pico de decomposição dos compósitos ocorreu entre aproximadamente 700 e 730 °C, sem diferenças expressivas entre os tratamentos. Após o envelhecimento acelerado (Figura 10d), esse comportamento foi mantido, confirmando que o principal pico de decomposição

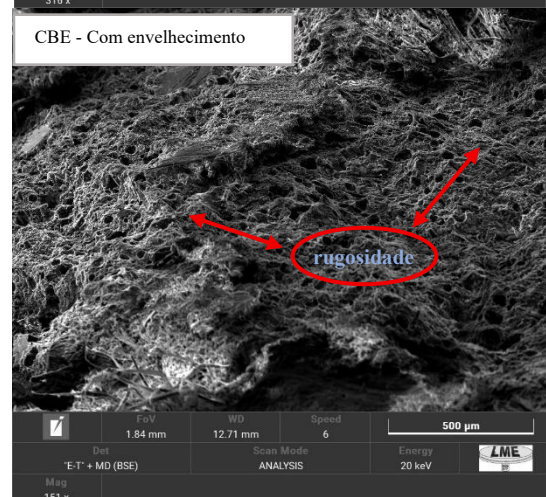
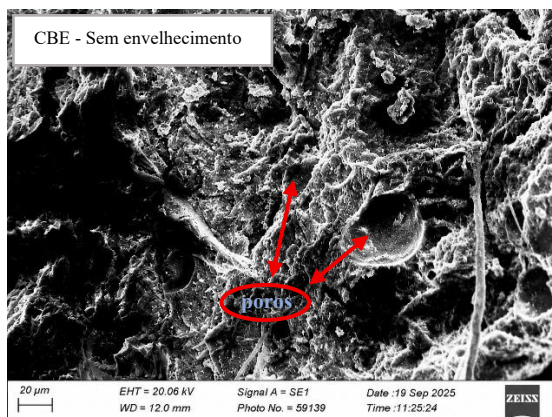
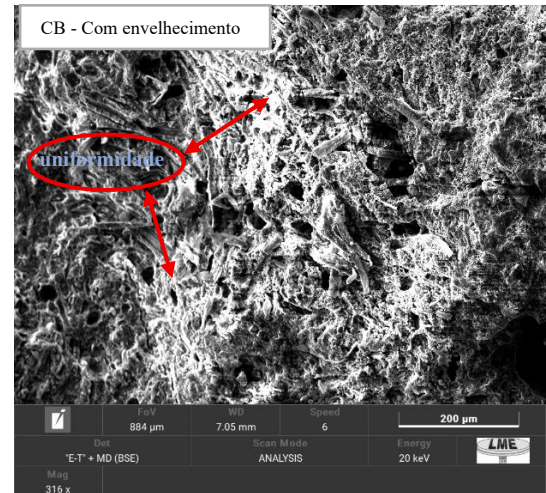
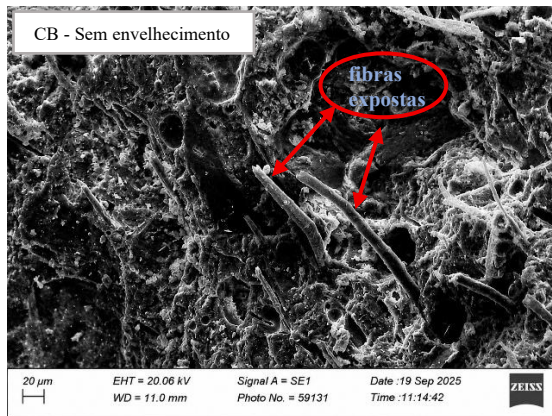
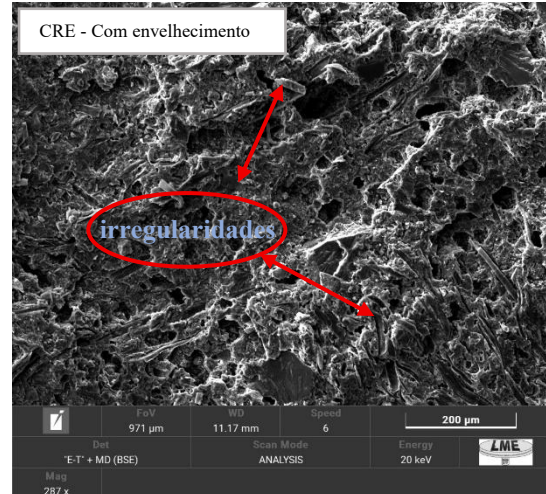
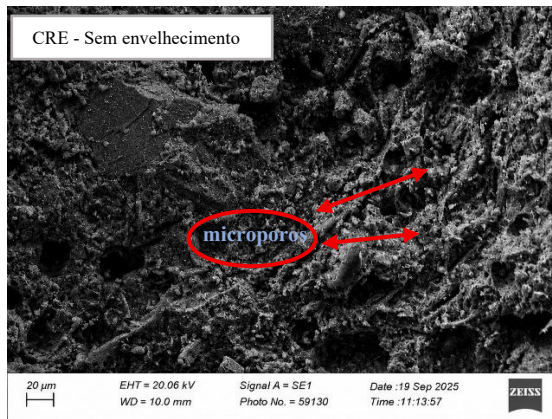
permaneceu concentrado na mesma faixa de temperatura para todos os tratamentos. Esses resultados corroboram as curvas TG, indicando que o envelhecimento não promoveu deslocamentos significativos nas temperaturas características de decomposição. Segundo Liu e Lv (2021), tratamentos superficiais aplicados às fibras naturais tendem a exercer maior influência sobre a interface fibra-matriz e sobre o comportamento físico dos compósitos do que propriamente sobre sua estabilidade térmica. De maneira semelhante, Ramos *et al.* (2024) observaram que modificações superficiais das fibras podem melhorar aspectos relacionados à durabilidade dos compósitos, sem alterar significativamente os mecanismos fundamentais de degradação térmica da matriz cimentícia.

3.7 Análise microestrutural dos compósitos

A Figura 11 apresenta as micrografias das superfícies de fratura dos compósitos de fibrocimento nas condições sem e com envelhecimento acelerado. De modo geral, observa-se a presença de poros, cavidades e regiões associadas ao arrancamento das fibras (*pull-out*), características típicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais. Segundo Savastano Junior *et al.* (2005), Tonoli *et al.* (2019) e Silva Neto *et al.* (2025), a interação entre as fibras e a matriz desempenha papel fundamental na morfologia da superfície de fratura e nos mecanismos de ruptura desses materiais. Além disso, a distribuição dos vazios e a organização microestrutural influenciam diretamente o comportamento físico e mecânico dos compósitos (Correia *et al.*, 2018).

Figura 11 - Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos antes e após o envelhecimento acelerado.





Legenda: CR: Compósito de referência; CRE: Compósito de referência com revestimento em EVA; CB: Compósito com fibras tratadas com BCS; CBE: Compósito com fibras tratadas com BCS e revestimento em EVA.

Fonte: Autor (2026).

Para os compósitos de referência (CR), a condição sem envelhecimento apresenta uma superfície de fratura heterogênea, com presença de poros, regiões de descontinuidade e fibras parcialmente expostas, sugerindo a ocorrência de mecanismos associados ao arrancamento das fibras (*pull-out*) e à interação fibra-matriz. Após o envelhecimento acelerado, observa-se uma superfície mais homogênea, com menor evidência de fibras expostas e maior continuidade da matriz cimentícia, sugerindo uma microestrutura mais compacta, em concordância com os resultados de redução da porosidade e absorção de água observados nos ensaios físicos. Essas alterações indicam reorganização microestrutural decorrente da continuidade das reações de hidratação, conforme descrito por Tonoli *et al.* (2019) e Xaysombath *et al.* (2025).

As micrografias dos compósitos de referência revestidos com EVA (CRE) evidenciam uma matriz relativamente heterogênea na condição sem envelhecimento, com presença de microporos e regiões mais compactas distribuídas pela superfície de fratura. A aplicação do revestimento em EVA pode ter contribuído para modificações na interface entre os constituintes e na morfologia da matriz cimentícia. Após o envelhecimento acelerado, observa-se uma superfície mais irregular e heterogênea, com alterações na distribuição dos poros e na continuidade da matriz, indicando modificações microestruturais decorrentes da presença do revestimento polimérico. Segundo Bomediano, Gomes e Fontanini (2020), a incorporação de polímeros em materiais cimentícios pode influenciar a distribuição dos poros e a morfologia das superfícies de fratura.

Para os compósitos com fibras tratadas com baba de cupim sintética (CB), a condição sem envelhecimento apresenta maior quantidade de fibras expostas e cavidades associadas ao arrancamento das fibras, evidenciando maior ocorrência de mecanismos de (*pull-out*) durante a fratura. Esses mecanismos estão associados à dissipação de energia e à capacidade de redistribuição das tensões no interior do compósito. Após o envelhecimento acelerado, verifica-se uma superfície mais uniforme, com menor evidência de regiões de (*pull-out*) e maior continuidade da matriz cimentícia. Adicionalmente, observam-se regiões com aspecto mais contínuo envolvendo parcialmente as fibras, sugerindo modificações na zona de transição fibra-matriz e maior compactação da microestrutura. Essas observações corroboram os resultados físicos obtidos para esse grupo, caracterizados pela expressiva redução da porosidade e absorção de água e pelo aumento da densidade aparente, além da manutenção do módulo de ruptura após o envelhecimento acelerado. Resultados semelhantes foram relatados por Tonoli *et al.* (2009) e Silva Neto *et al.* (2025), que associaram modificações interfaciais ao refinamento microestrutural de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais.

Os compósitos com fibras tratadas com baba de cupim sintética e revestidos com EVA (CBE) apresentaram as alterações microestruturais mais pronunciadas. Na condição sem envelhecimento, observaram-se poros de diferentes dimensões, fibras parcialmente expostas e regiões associadas ao arrancamento das fibras. Após o envelhecimento acelerado, a superfície de fratura tornou-se mais homogênea e rugosa, com menor evidência de fibras expostas e maior continuidade da matriz, sugerindo modificações na interação entre os constituintes e nos mecanismos de fratura. A elevada rugosidade observada pode estar relacionada ao aumento da capacidade de dissipação de energia, corroborando o incremento significativo da tenacidade desse grupo. Resultados semelhantes foram relatados por Tonoli *et al.* (2019), Teixeira *et al.* (2022) e Li *et al.* (2025), que destacam a influência de alterações na interface fibra-matriz e de modificações poliméricas sobre a morfologia das superfícies de fratura e o comportamento mecânico de compósitos cimentícios.

4 CONCLUSÃO

Os tratamentos das fibras de eucalipto com baba de cupim sintética e a aplicação do revestimento de EVA influenciaram significativamente o desempenho dos compósitos de fibrocimento extrudado.

Os resultados físicos demonstraram que o envelhecimento acelerado tendenciou redução da porosidade e da absorção de água, acompanhada pelo aumento da densidade aparente, indicando refinamento da microestrutura dos compósitos. O tratamento com baba de cupim sintética destacou-se pela expressiva redução da absorção de água e pelos menores valores de condutividade térmica, evidenciando potencial para aplicações que demandam maior durabilidade e conforto térmico.

Em relação ao desempenho mecânico, o compósito contendo fibras tratadas com baba de cupim sintética apresentou manutenção do módulo de ruptura após o envelhecimento acelerado, enquanto a combinação entre baba de cupim sintética e revestimento em EVA promoveu aumento significativo da tenacidade, indicando maior capacidade de absorção de energia e alterações nos mecanismos de fratura.

As análises termogravimétricas mostraram que os tratamentos aplicados não promoveram alterações significativas nos mecanismos de degradação térmica dos compósitos, enquanto as análises microestruturais evidenciaram modificações na interface fibra-matriz e reorganização da estrutura interna, corroborando os resultados físicos e mecânicos obtidos.

Dessa forma, conclui-se que a utilização da baba de cupim sintética e do revestimento em EVA constitui uma estratégia promissora para o desenvolvimento de compósitos de fibrocimento extrudado com propriedades aprimoradas, especialmente quanto à durabilidade, ao desempenho térmico e à capacidade de dissipação de energia.

Como perspectivas futuras, recomenda-se investigar diferentes teores de baba de cupim sintética e de EVA, além de realizar ensaios de durabilidade em condições naturais de exposição. Adicionalmente, a avaliação de outras fibras vegetais como materiais de reforço poderá contribuir para o aprofundamento do conhecimento acerca do comportamento desses compósitos e para a ampliação de suas aplicações na construção civil.

REFERÊNCIAS

- ALVES, N. E. M. *et al.* Composição química e potencial de aplicação do *Eucalyptus urograndis* na indústria de celulose e bioenergia. **Caderno Pedagógico**, v.22, nº5, 2025. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/15200>. Acesso em: 09 maio 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**. Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**. Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**. Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010b. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**. Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003b. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**. Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**. Painéis de fibrocimento – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**. Pasta celulósica e madeira- determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010a. 6 p.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1131-20**: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C948-81(2023)**: Standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-ceramic materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FIBROCIMENTO (ANF). **O fibrocimento**. Disponível em: <https://anfibro.org.br/o-fibrocimento>. Acesso em: 19 abr. 2025.

BATISTA, Felipe Gomes. **Aproveitamento da madeira de seringueira e resíduos de mineração para produtos de maior valor agregado**. 2024. 97 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/items/89b1f32f-f05b-4d42-8ead-6b36f42d41e8>. Acesso em: 20 jan. 2026.

BATISTA, Felipe Gomes *et al.* Impact of mineralization in Hevea brasiliensis fibers on the production of extruded fiber-cements with cellulosic micro/nanofibrils (MFC/NFC) and quartzite residues. **Journal of Building Engineering**, v. 95, p. 110183, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224017510?via%3Dihub>. Acesso em: 27 abr. 2026.

BARROS, J. G. *et al.* Viabilidade do uso de fibras vegetais para construções sustentáveis: uma revisão. 2023. **Revista observatorio de la economia latinoamericana**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/375678941>. Acesso em 21 nov. 2025.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007.

BISKRI, Y.; *et al.* Sobre o comportamento físico-mecânico do compósito de fibrocimento: Efeito do tratamento químico das fibras de sisal. **Revista de Engenharia de Edificações**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710225002141>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BLINDASOLO. **Empresa especializada em soluções para controle de umidade e impermeabilização**. 2024. Disponível em: <https://www.blindasolo.com.br>. Acesso em: 18 maio 2025.

BOMEDIANO, K. S.; GOMES, C. E. M.; FONTANINI, P. S. P. Propriedades da argamassa modificada com polímeros redispersíveis de etileno-acetato de vinila (EVA). **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 419-429, 2020. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/96672>. Acesso em: 10 out. 2025.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. Warrenville: Interscience, 1963. 689 p.

CORRÊA, A. A. R.; MENDES, L. M.; BARBOSA, N. P.; PROTÁSIO, T. P.; CAMPOS, N. A.; TONOLI, G. H. D. Incorporation of bamboo particles and “synthetic termite saliva” in adobes. **Construction and Building Materials**, Guildford, 2015. v. 98, p. 250-256. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.009>. Acesso em 18 de maio de 2025.

CORREIA, Viviane da Costa; SANTOS, Sergio Francisco; TEIXEIRA, Ronaldo Soares; SAVASTANO JUNIOR, Holmer. Nanofibrillated cellulose and cellulosic pulp for reinforcement of the extruded cement-based materials. *Construction and Building Materials*, v. 160, p. 376–384, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817322699?via%3Dihub>. Acesso em: 28 fev. 2026.

COUTTS, R. S. P. High yield wood pulps as reinforcement for cement products. *Appita*, v. 39, n. 1, 1986a.

DA SILVA NETO, J. T.; SOARES JÚNIOR, P. R.; REIS, E. D.; *et al.* Fiber-reinforced cementitious composites: recent advances and future perspectives on key properties for high-performance design. *Discover Civil Engineering*, 2025. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s44290-025-00209-9>. Acesso em: 10 out. 2025.

DIAS, C. M. R. **Fibrocimentos com gradação funcional**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-31052011-164232/publico/Tesel_Cleber_Marcos_Dias.pdf. Acesso em: 15 nov. 2025.

DYNASOLO S.A. **Tecnologia em estabilização de solos**. S.d. Disponível em: <https://www.dynasolo.com.br>. Acesso em: 20 maio 2025.

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

FARIA, O. B. *et al.* Influência da adição de baba de cupim sintética em misturas terrosas. *Acta Científica*, 2016. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/dJ95QX6Km4Zszx3cwFYXMpt/>. Acesso em: 14 maio 2025.

FILOMENO, Rafael Henrique. **Estudo e avaliação da carbonatação acelerada no fibrocimento sob aspectos de cura, desempenho físico-mecânico, microestrutura e permeabilidade**. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-07022024-111809/>. Acesso em: 20 out. 2025.

FONSECA, Camila Soares *et al.* Micro/nanofibrilas celulósicas de Eucalyptus em fibrocimentos extrudados. *Cerne*, v. 22, n. 1, p. 59-68, jan./mar. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/M8P8d9q4fMV9jtBX8nHC4hD/?format=pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

FONSECA, Camila Soares. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com fibras e nanofibrilas de juta**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Biomateriais, Lavras, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/items/1a63db2d-130f-4597-8e6b-ff62078205e1>. Acesso em: 27 abr. 2025.

FUNDACENTRO. Amianto: seminários e oficinas - **desafios contemporâneos após o banimento**. Brasília: Fundacentro, 02 out. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/comunicacao/noticias/noticias/2024/outubro/amianto-e-pauta-de-seminario-e-oficinas-na-fundacentro>. Acesso em: 18 nov. 2025.

GANDIA, R. M.; CORREA, A. A. R.; GOMES, F. C.; MACHADO, L.F.; GUFFEY, S. V. G. **Efeito da adição de baba de cupim sintética no adobe quanto a densidade aparente.** 15º Congresso Nacional de Meio Ambiente. Poços de Caldas, 2018.

HASAN, K. M. Faridul; HORVÁTH, Péter György; ALPÁR, Tibor. Development of lignocellulosic fiber reinforced cement composite panels using semi-dry technology. *Cellulose*, v. 28, n. 6, p. 3631–3645, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-021-03755-4?>. Acesso em: 19 mar. 2026.

HEWLETT, Peter C.; LISKA, Martin (ed.). *Lea's chemistry of cement and concrete*. 5. ed. **Oxford: Butterworth-Heinemann**, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081007730/leas-chemistry-of-cement-and-concrete>. Acesso em: 19 fev. 2026.

JIS. Japanese Standards Association. **JIS 1412–2**. Test method for thermal resistance and related properties of thermal insulations-Part 2: heat flow meter apparatus, 2016.

KABIR, M. M. *et al.* Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites : An overview. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2883-2892, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812002922?via%3Dihub>. Acesso em: 10 maio 2026.

Kennedy F, Phillips GO, Willians PA. *Wood and cellulose, industrial utilization, biotechnology, structure and properties*. Ellis Horwood, Chichester, 1987.

KHAMPUT, P.; *et al.* Flexural Behavior of Fiber Cement Boards Reinforced with Young and Mature Coconut Fibers. **Applied Sciences**, v. 14, n. 23, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/10786>. Acesso em 20 de nov. de 2025.

KHAN, K. A. *et al.* Effect of EVA on mechanical properties of cement. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-018-3249-4>. Acesso em: 10 nov. 2025.

LI, L.; KHAN, M.; JIANG, X.; SHAKOR, P.; ZHANG, Y. Sustainable fiber reinforced cementitious composites for construction and building materials. **Frontiers in Materials**, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2023.1237960/pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

LI, Z.; *et al.* Analysis of fire resistance of ethylene-vinyl acetate polymer calcium sulfoaluminate cement mortars. **Materials Science-Poland**, v. 43, n. 2, p. 87–100, 2025. Disponível em: <https://sciendo.com/article/10.2478/msp-2025-0021>. Acesso em: 10 out. 2025.

LIU, Jie; LV, Chun. Research progress on durability of cellulose fiber-reinforced cement-based composites. **International Journal of Polymer Science**, Article ID 1014531, p. 1-13, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2021/1014531>. Acesso em: 19 fev. 2026

MAHAMAT, A. A.; LEKLOU, N.; OBIANYO, I. I.; STANISLAS, T. T.; AYENI, O.; BIH, N. L. Avaliação das características microestruturais e físico-mecânicas de solo de cupinzeiro estabilizado com cimento para aplicação na construção civil. **Discover Civil Engineering**, v. 1, art. 54, 2024. DOI: 10.1007/s44290-024-00058-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44290-024-00058-y>. Acesso em: 05 nov. 2025.

MANSO-MORATO, J. *et al.* Fiber-Reinforced concrete and its life cycle assessment. **Journal of Building Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224016309>. Acesso em: 18 nov. de 2025.

MEHMOOD, M.; *et al.* Avaliação do ciclo de vida de compósitos cimentícios de alto desempenho ecológicos, incorporando resíduos de construção e industriais. **Scientific Reports**, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-21151-x>. Acesso em: 21 de nov. de 2025.

MELO, A. B. *et al.* Cement blocks with EVA waste. **Revista IEM**, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/DxJFsXRgpWpKvdP6DxqK9dJ/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MOHR, B.J., NANKO, H. e KURTIs, K.E. (2005) Durabilidade dos Compósitos de Fibra e Cimento de Pulpa Kraft para Ciclagem Úmida/Seca. *Compósitos de Cimento e Concreto*, 27, 435-448. 2005. **Cement and Concrete Composites**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946504001568?via%3Dihub>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de fibrocimento e análise de participação**: tendência e previsões de crescimento (2024-2029). Índia, 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/fiber-cement-market>. Acesso em: 19 abr. 2025.

POLETTTO, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M. C. ; SANTANA, R. M. C. *Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size*. **Bioresource Technology**, v. 109, p. 148-153, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852411017330?via%3Dihub>. Acesso em: 10 maio 2026.

RAMOS, R. D. *et al.* Influência da densidade básica e da composição química da madeira para a indústria de polpa celulósica: um estudo de caso. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 3, e85566, p. 1- 21, jul./set. 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/3QHfbgTwXjHXnzZcdj8XR7n/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 09 maio 2026.

ROCHA, Diego Lilargem; TAMBARA JÚNIOR, Luís Urbano Durlo; MARVILA, Markssuel Teixeira; PEREIRA, Elaine Cristina; SOUZA, Djalma; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de. A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 10, p. 2043, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/10/2043>. Acesso em: 19 mar. 2026.

SANTOS, R. C. *et al.* Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v.26, n.2, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/22765>. Acesso em: 09 maio 2026.

SAVASTANO JÚNIOR, Holmer. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/3/tde-08102007-155734/>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SAVASTANO JUNIOR, H.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Sustainability of vegetable fibres in construction., v. 33, n. 3, p. 244–252, 2005. **Woodhead**. Disponível em : <https://personales.upv.es/~vamigo/Holmer/02-fibras%20vegetales/Chap%203.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2025.

SCHIAVI, L. S. de O.; GONÇALVES, M. A.; DELGADO-SILVA, A. O.; RANGEL, E. C.; RAMALHO, T. de C.; MENDES, R. F.; VAZ, L. E. V. de S. B. Properties of fiber cement reinforced with cellulose pulp modified by plasma treatment with sulfur hexafluoride (SF₆). **Cellulose**, v. 31, p. 5055-5076, 2024. DOI: 10.1007/s10570-024-05885-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-024-05885-x>. Acesso em: 15 nov. 2025.

SHANG, H. *et al.* EVA-enhanced cementitious coatings. **Construction and Building Materials**, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223012597>. Acesso em: 13 set. 2025.

SILVA NETO, R. *et al.* Recent advances in fiber-reinforced cementitious composites: properties, challenges and design considerations. **Construction and Building Materials**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710225005649>. Acesso em: 05 set. 2025.

SOARES, L. A. *et al.* Efeito da combinação de aditivos surfactantes em fibrocimento extrudado reforçado com fibras de sisal in natura. **Ambiente Construído**, 2025. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/138066>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SOTO, Yatsen Jepthe Maldonado. **Adequação de formulações para a produção de placas de fibrocimento por extrusão**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-04072012-180623/pt-br.php>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SWISSPEARL. Sustainability Report. **Swisspearl AG**, 2022. Disponível em: <https://www.swisspearl.com/the-first-swisspearl-sustainability-report>. Acesso em: 20 de nov. de 2025.

SOUSA, A. *et al.* A Review of the Use of Natural Fibers in Cement Composites : Concepts, Applications and Brazilian History. **Polymers**, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/10/2043>. Acesso em: 10 nov. 2025.

TEIXEIRA, Julia Naves. **Avaliação das propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos produzidos a partir de materiais lignocelulósicos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/12770>. Acesso em: 20 out. 2025.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Coir fiber as reinforcement in cement-based materials. *Advances in bio-based fiber: moving towards a green society*. Cambridge: **Elsevier**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824543-9.00008-6>. Acesso em: 27 fev. 2026.

TERRA I.C.D.C., BATISTA F.G., SILVA D.W., SCATOLINO M.V., ALVES JUNIOR F.T., MARTINS M.A., MENDES L.M. Mining waste and coconut fibers as an eco-friendly reinforcement for the production of concrete blocks. **Environmental Science and Pollution Research** **30**:62641–62652. (2023) <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26493-5>.

TOKUDA, G. *et al.* Hidden cellulases in termites : revision of an old hypothesis. **The Royal Society B**, 2007. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2464699/>. Acesso em: 28 out. 2025.

TONOLI, Gustavo Henrique Denzin *et al.* Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**. Amsterdam: Elsevier. 2019 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.159>. Acesso em: 10 set. 2025.

TONOLI, Gustavo Henrique Dezin. **Fibras curtas de eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 128 f., 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-18022010-142936/pt-br.php>. Acesso em: 29 abr. 2025.

TONOLI, G. H. D. *et al.* Effects of eucalyptus fibre surface properties on the microstructure of cement-based composites. **IIBCC 2010 Proceedings**. Disponível em: <https://www.iibcc.biz/wp-content/uploads/2019/05/IIBCC2010-Proceedings-Effects-eucalyptus-fiber-surface-properties-microstructure-cement-based-composites.pdf>. Acesso em 21 de nov. 2025.

XAYSOMBATH, P.; SOYKEABKAEW, N.; WATTANASIRIWECH, D.; WATTANASIRIWECH, S. Effect of natural fiber characteristics on properties of cementitious composites: a comparison of recycled pulp from beverage cartons, bamboo, and eucalyptus fibers. **Construction Materials**, Basel, v. 5, n. 3, p. 50, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-7108/5/3/50>. Acesso em: 19 mar. 2026.

YANG, H. *et al.* *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20939644> Acesso em: 10 maio 2026.

YEON, K.-S.; KIM, K. K.; YEON, J.; LEE, H. J. Fresh Properties of EVA-Modified Cementitious Mixtures for Use in Additive Construction by Extrusion. **Materials**, v. 12, n. 14, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/14/2292>. Acesso em: 10 out. 2025.

ZHANG, W. *et al.* Influence of hornification and carbonatation on the long-term performance of cellulose fiber-cement composites. **Journal of Building Pathology**, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44290-025-00209-9>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ZHU, K.; *et al.* Fibras de cimento flexíveis com alta tenacidade e comportamento de fixação ativado por água para construção. **Nature Communications**, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-61855-2>. Acesso em: 21 nov. de 2025.