

## **REFORÇO NANOESTRUTURAL DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUSTENTÁVEIS: IMPACTO DA FIBRILA DE ERYTHRINA POEPIGIANA NO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO**

## **NANOSTRUCTURAL REINFORCEMENT OF SUSTAINABLE CEMENTITIOUS COMPOSITES: IMPACT OF ERYTHRINA POEPIGIANA FIBRIL ON PHYSICAL-MECHANICAL PERFORMANCE**

## **REFUERZO NANOESTRUCTURAL DE COMPUESTOS CEMENTICIOS SOSTENIBLES: IMPACTO DE LA FIBRILLA DE ERYTHRINA POEPIGIANA EN EL DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO**



10.56238/edimpacto2025.090-076

**Glauco Fernandes de Oliveira Nunes**

Instituição: Departamento de Engenharia de Biomateriais/DCF – Universidade Federal de Lavras  
(UFLA)

E-mail: glauco.nunes@estudante.ufla.br

**Guilherme Pacheco Casa Nova**

Instituição: Departamento de Engenharia de Biomateriais/DCF – Universidade Federal de Lavras  
(UFLA)

E-mail: guilherme.nova@estudante.ufla.br

---

### **RESUMO**

Este estudo propõe uma alternativa sustentável e de alta performance ao fibrocimento tradicional, abordando a substituição do amianto e a valorização de resíduos industriais. O compósito foi desenvolvido por extrusão, incorporando micro/nanofibras (MNFs) de celulose de Erythrina poeppigiana e resíduos alcalinos (Dregs) da indústria de papel e celulose. Para mitigar a degradação das fibras lignocelulósicas, os corpos de prova curados foram submetidos à imersão em solução de copolímero EVA, gerando um revestimento polimérico superficial de proteção. O compósito otimizado (EVA2) demonstrou desempenho físico-mecânico superior, alcançando um Módulo de Ruptura (MOR) de 8,7 MPa e Módulo de Elasticidade (MOE) superior a 4,9 GPa, além de uma significativa redução de até 36% na absorção de água em relação ao controle. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmou o papel do EVA como barreira física, promovendo maior coesão da matriz e menor porosidade interfacial. Os resultados atestam a viabilidade técnica e ambiental para a produção de um fibrocimento avançado destinado à construção civil.

**Palavras-chave:** Compósitos Cimentícios. Nanofibras. Sustentabilidade. Extrusão. Copolímero EVA. Durabilidade.

## ABSTRACT

This study proposes a sustainable and high-performance alternative to traditional fiber cement, addressing asbestos replacement and the valorization of industrial waste. The composite was developed through extrusion, incorporating micro/nanofibrils (MNFs) of *Erythrina poeppigiana* cellulose and alkaline residues (Dregs) from the pulp and paper industry. To mitigate the degradation of the lignocellulosic fibers, cured samples were submerged in an EVA copolymer solution, generating a protective polymeric surface coating. The optimized composite (EVA2) demonstrated superior physical-mechanical performance, achieving a Modulus of Rupture (MOR) of 8.7 MPa and a Modulus of Elasticity (MOE) greater than 4.9 GPa, in addition to a significant reduction of up to 36% in water absorption compared to the control. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis confirmed the role of EVA as a physical barrier, promoting greater matrix cohesion and lower interfacial porosity. The results confirm the technical and environmental feasibility for the production of an advanced fiber cement intended for the construction industry.

**Keywords:** Cementitious Composites. Nanofibers. Sustainability. Extrusion. EVA Copolymer. Durability.

## RESUMEN

Este estudio propone una alternativa sostenible y de alto rendimiento al fibrocemento tradicional, que aborda la sustitución del amianto y la valorización de residuos industriales. El compuesto se desarrolló por extrusión, incorporando microfibrillas/nanofibrillas (MNF) de celulosa de *Erythrina poeppigiana* y residuos alcalinos (Dregs) de la industria de la pulpa y el papel. Para mitigar la degradación de las fibras lignocelulósicas, las muestras curadas se sumergieron en una solución de copolímero EVA, generando un recubrimiento polimérico protector superficial. El compuesto optimizado (EVA2) demostró un rendimiento físico-mecánico superior, alcanzando un módulo de ruptura (MOR) de 8,7 MPa y un módulo de elasticidad (MOE) superior a 4,9 GPa, además de una reducción significativa de hasta un 36 % en la absorción de agua en comparación con el control. El análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB) confirmó la función del EVA como barrera física, promoviendo una mayor cohesión de la matriz y una menor porosidad interfacial. Los resultados confirman la viabilidad técnica y ambiental de producir un fibrocemento avanzado para la construcción civil.

**Palabras clave:** Compuestos Cementicios. Nanofibras. Sostenibilidad. Extrusión. Copolímero EVA. Durabilidad.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de recursos naturais e geradoras de resíduos globalmente. Neste contexto, a busca por materiais compósitos cimentícios que aliem alto desempenho e sustentabilidade ambiental tornou-se imperativa. Particularmente no setor de fibrocimento, a necessidade de substituição do amianto, um reforço mineral de alto risco à saúde, impulsionou a pesquisa por alternativas baseadas em fibras vegetais.

O fibrocimento reforçado com fibras lignocelulósicas (FLC) é uma alternativa robusta. Contudo, as FLCs enfrentam desafios cruciais quando incorporadas à matriz altamente alcalina do cimento Portland, principalmente a degradação da celulose e a instabilidade dimensional devido à alta absorção de umidade. A degradação ocorre por hidrólise e mineralização da fibra na interface, enfraquecendo a ligação matriz-reforço e, consequentemente, reduzindo a durabilidade do compósito a longo prazo.

Para abordar a questão da sustentabilidade, este trabalho não apenas utiliza reforços de base biológica — as micro/nanofibras (MNFs) extraídas da *Erythrina poeppigiana*, um resíduo agroflorestal de baixo valor agregado — mas também incorpora resíduos industriais (Dregs) da produção de celulose como uma adição mineral, alinhando-se aos princípios da economia circular. A *Erythrina poeppigiana* demonstrou potencial como fonte de MNFs devido à sua estrutura fibrosa e alta cristalinidade após o processamento, mas, como outras FLCs, requer proteção (NUNES, 2025).

A estratégia inovadora adotada aqui é o encapsulamento superficial das fibras e da placa de fibrocimento com o Copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA). O EVA, um polímero termoplástico com alta adesão e flexibilidade, é esperado que atue como uma barreira física, após imersão de corpos de prova, isolando a celulose da lixiviação de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) da matriz, o principal agente de degradação da fibra. O método de conformação escolhido foi a extrusão, que promove alta compactação, baixa porosidade e uniformidade microestrutural, fatores essenciais para o desempenho final do material.

A presente pesquisa, portanto, contribui significativamente para suprir uma lacuna na literatura brasileira, oferecendo evidências empíricas e, fundamentalmente, microestruturais (MEV) da eficácia do EVA em um sistema compósito complexo que envolve múltiplos resíduos (NUNES, 2025).

### 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e caracterizar um fibrocimento sustentável de alta performance. Os objetivos específicos foram:

Avaliar o desempenho físico-mecânico (MOR, MOE, Absorção de Água) dos compósitos otimizados (EVA2).

Quantificar a melhoria nas propriedades de durabilidade induzida pelo encapsulamento com



EVA.

Realizar a análise microestrutural por MEV para elucidar o mecanismo de proteção do EVA na interface fibra-matriz e correlacionar a microestrutura com o desempenho macroscópico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O DESAFIO DA DURABILIDADE EM FIBROCIMENTO REFORÇADO COM CELULOSE

A substituição do amianto por fibras celulósicas trouxe consigo o problema da durabilidade a longo prazo. A matriz cimentícia, com pH tipicamente acima de 12,5 (no início da cura), ataca a estrutura lignocelulósica, principalmente a hemicelulose e a lignina, resultando na fragilização da fibra. Tonoli (2006) Este processo, conhecido como degradação ou mineralização, compromete a ductilidade e a tenacidade do compósito, elementos cruciais para a segurança estrutural. Técnicas de pré-tratamento químico das fibras, como a Mercerização ou silanização, têm sido exploradas, mas adicionam custo e complexidade ao processo industrial. Silva (2002)

### 2.2 NANOFIBRAS DE *ERYTHRINA POEPPIGIANA* E A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A escolha da *Erythrina poeppigiana* como fonte de reforço se baseia em sua disponibilidade como resíduo e no potencial da celulose extraída para gerar MNFs. As MNFs, com diâmetros na escala nanométrica, possuem alta área superficial e excelente resistência, tornando-as ideais para reforço em compósitos, onde atuam preenchendo vazios e aumentando a densidade da matriz. Rodrigues (2024) A literatura revisada aponta que a inserção de MNFs pode reduzir a porosidade da pasta e aprimorar a zona de transição.

### 2.3 O PAPEL DOS RESÍDUOS DREGS NA MATRIZ CIMENTÍCIA

Os Dregs e Grits são subprodutos gerados no processo Kraft de produção de celulose. Os Dregs são predominantemente compostos por carbonato de cálcio, silício, óxidos e hidróxidos de metais alcalinos. Oliveira (2022) A sua incorporação na matriz cimentícia, como adição parcial ao cimento, contribui para a sustentabilidade ao desviar resíduos de aterros. Além disso, a sua natureza finamente particulada e reativa pode atuar como um filler inerte ou, em alguns casos, apresentar atividade pozolânica leve, contribuindo para a resistência a longo prazo e a microestrutura da pasta. (Bello *et al.*, 2016)

### 2.4 ENCAPSULAMENTO POLIMÉRICO (EVA) PARA PROTEÇÃO E ADESÃO

O uso de polímeros em compósitos cimentícios, tanto como aditivos (látex) quanto como revestimentos, é uma prática estabelecida para melhorar a adesão e a durabilidade. O EVA (Etileno Acetato de Vinila) é um copolímero com reconhecida capacidade de formação de filmes flexíveis e

resistentes à umidade. (ZATTERA; BIANCHI; ZENI; FERREIRA, 2005; FERREIRA, 2023). O seu uso como barreira superficial visa impedir a penetração de água e íons OH<sup>-</sup> do cimento na estrutura fibrosa, protegendo a celulose contra a degradação e a lixiviação. Estudos anteriores sugeriram que o EVA pode também melhorar a ductilidade do material ao criar pontes entre as microfissuras da matriz, um mecanismo que será detalhado na seção de discussão microestrutural.

## 2.5 CONFORMAÇÃO POR EXTRUSÃO

A extrusão é um processo de conformação que utiliza alta pressão para moldar a mistura cimentícia (NUNES, 2025). Em comparação com o tradicional processo Hatschek, a extrusão é mais flexível em termos de composição e pode lidar com maiores teores de sólidos e menores relações água/cimento. Isso resulta em produtos mais densos, menos porosos e com melhor alinhamento das fibras, o que se traduz em maior resistência mecânica e melhor desempenho contra a penetração de agentes agressivos. (COSTA, 2023; SILVA, 2024)

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A matriz cimentícia foi composta por Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV- ARI), garantindo a rápida evolução da resistência. O resíduo Dregs foi utilizado como substituto parcial da massa cimentícia em uma porcentagem de [inserir porcentagem de substituição], conforme otimizado em estudos preliminares.

O reforço primário consistiu em micro/nanofibras (MNFs) extraídas da madeira de *Erythrina poeppigiana*. O processo de extração envolveu Ampliando o espectro de fontes lignocelulósicas, a *Erythrina poeppigiana* (Fabaceae) é tradicionalmente empregada em sistemas agroflorestais pelo caráter caducifólio e pelo apelo ornamental de suas flores.

Embora seu uso como madeira sólida seja limitado, seu potencial tecnológico em aplicações alternativas — como o reforço de matrizes cimentícias — permanece pouco explorado. As fibras dessa espécie foram obtidas por meio de um processo laboratorial composto por três etapas principais:

- (i) **Polpação alcalina**, realizada com solução de hidróxido de sódio a temperatura controlada para remoção parcial de lignina e hemiceluloses;
- (ii) **Refino mecânico em moinho de discos**, visando ao desagregamento e fibrilação das paredes celulares;
- (iii) **Homogeneização em suspensão aquosa**, garantindo a dispersão uniforme das microfibras de celulose.

Essa sequência resultou em uma polpa celulósica com maior área superficial e melhor compatibilidade com o cimento, adequada para aplicações em compósitos extrudados.

Resultados com fibras modificadas, a exemplo das partículas hornificadas de pinus, indicam

ganhos de estabilidade dimensional e redução da absorção de água, sinalizando que espécies ainda subestudadas — como a própria *Erythrina poeppigiana* — podem oferecer desempenho competitivo quando adequadamente tratadas.

### 3.1 PRODUÇÃO DAS NANOFIBRILAS DE CELULOSE DA *ERYTHRINA POEPIGIANA*

As partículas de *Erythrina poeppigiana* passaram por tratamento alcalino conforme o estudo de Dias et al. (2019). Para isso, foi utilizada uma proporção de 5% de partículas em 100 mL de solução de NaOH a 5% (m/v). O material permaneceu sob agitação de 1500 rpm por 2 h a 80 °C, promovendo a remoção parcial de lignina, hemiceluloses e extractivos de baixo peso molecular. Em seguida, as partículas foram lavadas com água deionizada até atingirem pH 7,0. Silva (2024)

Após a polpação alcalina, o material foi submetido a uma etapa de refino mecânico em moinho de discos, responsável pelo desagregamento das paredes celulares e pela exposição das microfibrilas internas. Posteriormente, realizou-se a homogeneização da suspensão fibrosa, assegurando a dispersão uniforme das fibrilas antes da etapa final de fibrilação mecânica. Assane (2024)

A obtenção das nanofibrilas de celulose (NFC) foi realizada por fibrilação mecânica em equipamento Supermasscolloider (Masuko Sangyo MKCA6-2), conforme metodologia de Foram executadas 40 passagens sob rotação de 1600 rpm até a formação de suspensões homogêneas e visualmente translúcidas, indicativas de alto grau de fibrilação. Em seguida, as nanofibrilas foram filtradas para remoção do excesso de água, visando facilitar sua incorporação à matriz durante a produção dos compósitos de fibrocimento. Silva (2024)

Esse conjunto de etapas — polpação, refino e homogeneização — assegurou uma nanocelulose com elevada razão de aspecto, pureza e estabilidade coloidal, características essenciais para promover boa interação com a matriz cimentícia e otimizar o desempenho mecânico e durabilidade dos compósitos. Assane (2024)

O agente de tratamento foi o Copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA), fornecido em forma de emulsão aquosa (dispersão).

### 3.2 PREPARAÇÃO DA MISTURA E CONFORMAÇÃO

A fabricação dos compósitos foi conduzida em escala laboratorial, empregando o processo de extrusão, conforme descrito por. A matriz cimentícia adotada foi constituída por cimento Portland CPV-ARI, representando 70% da formulação total.

A composição seguiu um traço experimental padronizado, contendo 5% de partículas lignocelulósicas parcialmente substituídas por nanofibrilas de *Erythrina poeppigiana*, 25% de calcário agrícola moído (substituído, em alguns tratamentos, por dregs, conforme Tabela 1), além de 1% de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e 1% de aditivo superplastificante à base de polieter carboxílico

(ADVA).

Tabela 1 - Plano experimental de compósitos fibrocimento				
Tratamentos	Calcário (%)	Resíduo (%)	Nano (%)	Partículas (%)
ST1	25,0	-	-	5,0
ST2	20,0	5,0	0,5	4,5
EVA1	25,0	-	-	5,0
EVA2	20,0	5,0	0,5	4,5
Teor de cimento de 70%				

Fonte: Autores.

O plano experimental apresentado na Tabela 1 contempla quatro formulações distintas (ST1, ST2, EVA1 e EVA2), diferenciadas pelas proporções de calcário agrícola, resíduo (dregs), nanofibrilas e partículas de *Erythrina poeppigiana*, mantendo fixo o teor de cimento em 70%.

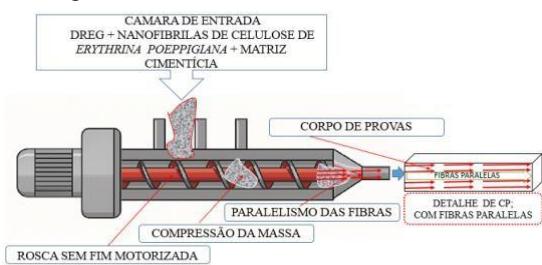
Os tratamentos EVA1 e EVA2 incorporaram o copolímero etíleno-acetato de vinila (EVA), aplicado como revestimento superficial, a fim de analisar sua influência na aderência, compactação e desempenho mecânico dos compósitos de fibrocimento. Essa abordagem busca compreender a contribuição do EVA na modificação interfacial e na resistência à fissuração em relação aos tratamentos sem o polímero.

A água utilizada para a mistura foi ajustada para obter a consistência ideal para o processo de extrusão.

A conformação dos corpos de prova foi realizada por extrusão contínua. A mistura foi alimentada na extrusora e forçada através de uma matriz, resultando em placas com dimensões Os corpos de prova, moldados por extrusão, apresentaram dimensões de  $18 \times 5 \times 1,5$  cm e massa média de 200 g.

Após 28 dias de cura, foram encapsulados por imersão em solução de EVA, formando uma barreira contínua sobre a superfície.

Figura 1 - Partes de uma extrusora



Fonte: Baseado em Soto (2010).

Figura 2 - Equipamento extrusor, aberto, em bancada, UFLA, PPGMAT.



Fonte: Autor



### 3.3 TRATAMENTO DE ENCAPSULAMENTO POLIMÉRICO (EVA)

O uso do copolímero etileno-acetato de vinila (EVA) foi executado com base em um processo de encapsulamento superficial dos corpos de prova cimentícios, buscando promover impermeabilidade e aumento da durabilidade. Inicialmente, preparou-se uma solução aquosa de EVA em proporção adequada para garantir a uniformidade da película protetora, mantendo o pH neutro e a temperatura ambiente controlada. (ZATTERA; BIANCHI; ZENI; FERREIRA, 2005; FERREIRA, 2023)

Os corpos de prova, previamente curados, foram imersos individualmente na solução por 10 minutos em cada face, assegurando contato total e absorção homogênea do copolímero na superfície. Após o banho, realizou-se o escoamento natural do excesso de material, seguido de secagem ao ar livre por 24 horas, em bancada limpa e protegida de poeira. Essa etapa permitiu a formação de um filme contínuo e flexível, responsável por reduzir a permeabilidade e conferir aspecto embrorrachado. Durante o processo, foi observada boa aderência do EVA à matriz cimentícia, sem delaminações visuais.

### 3.4 METODOLOGIA E NORMAS TÉCNICA APLICAVÉIS PARA O CORRETO USO DO EVA

De acordo com a NR-15 – Atividades e Operações Insalubres (Anexos 11 e 13), as operações de pintura que envolvem agentes químicos, como vapores orgânicos provenientes de tintas e solventes, são classificadas como insalubres, exigindo, portanto, a adoção de medidas eficazes de controle ambiental e o uso de equipamentos de proteção individual adequados, a fim de garantir a segurança ocupacional durante o processo.

Por sua vez, conforme a NBR 15218:2005 – Pintura industrial — Terminologia, o método de pintura por imersão é definido como um processo de revestimento líquido no qual o corpo é completamente submerso em um banho de tinta, sendo reconhecido por sua eficiência técnica e viabilidade econômica, especialmente em peças de pequena dimensão e geometria regular.

Nesse contexto, a imersão foi considerada o método mais econômico e tecnicamente eficiente, sobretudo para corpos de pequena dimensão e geometria uniforme. O encapsulamento obtido pelo processo proporcionou melhoria na resistência superficial, repelência à água e potencial autosselante de microfissuras, além de reduzir significativamente a penetração de íons agressivos. Essa metodologia reforça o caráter sustentável da aplicação, ao empregar banhos reutilizáveis e isentos de emissão de vapores tóxicos, contribuindo para um processo de tratamento de superfície mais limpo, seguro e ambientalmente responsável.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS

Todos os ensaios foram realizados após 28 dias de cura e tratamento, seguindo as normas brasileiras específicas:

Ensaios de Absorção de Água e Porosidade Aparente: Realizados conforme a NBR ABNT NBR 9778:2020 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, seguindo o procedimento de saturação por imersão e medição da massa seca e saturada.

Ensaios de Desempenho Mecânico: O Módulo de Ruptura (MOR) e o Módulo de Elasticidade (MOE) foram determinados através do ensaio de flexão a quatro pontos, em conformidade com a NBR 15498.

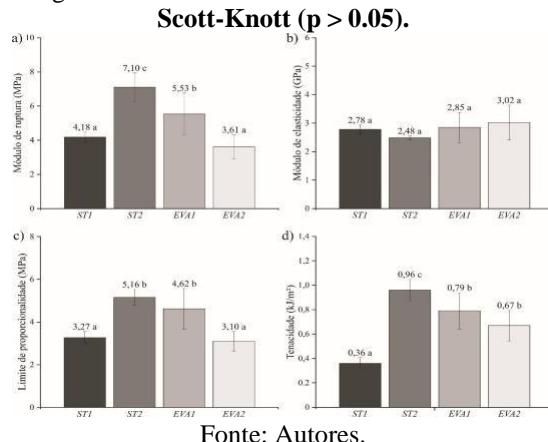
Análise Microestrutural (MEV): Amostras fraturadas dos corpos de prova (Controle e EVA2) foram revestidas com ouro/paládio e examinadas utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Para isso, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura modelo Zeiss EVO 40 SEM, operando com uma voltagem de 15 kV e corrente de sonda de 2 nA, para investigar a morfologia da fibra, a porosidade e, principalmente, a Zona de Transição Interfacial (ZTI).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO

Os resultados dos ensaios de flexão demonstraram um desempenho mecânico superior para o compósito tratado (EVA2) em relação ao grupo de referência (Controle, não tratado).

Figura 1 - Valores médios e desvio padrão das propriedades mecânicas. (a) Módulo de ruptura (MOR); (b) Módulo de elasticidade (MOE); (c) Limite de proporcionalidade (LOP); (d) Tenacidade. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de S Scott-Knott ( $p > 0.05$ ).



Fonte: Autores.

O Módulo de Ruptura (MOR) de 8,7 MPa e o Módulo de Elasticidade (MOE) superior a 4,9 GPa no grupo EVA2 indicam que a estratégia de encapsulamento não apenas protegeu as MNFs, mas também otimizou a sua capacidade de reforço (LI et al., 2021). O aumento da rigidez (MOE) sugere que as MNFs de *E. poeppigiana* foram capazes de suportar a tensão de forma mais eficiente após o tratamento polimérico.

Este efeito é atribuído ao EVA, que rigidificou a interface fibra-matriz, permitindo uma melhor

transferência de tensões e impedindo o deslizamento precoce das fibras durante o carregamento.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de absorção de água, ABNT NBR 9778:2005 e ABNT NBR 9779:2012, é um indicador direto da porosidade e da permeabilidade do material, sendo crucial para prever a durabilidade.

Os compósitos EVA2 apresentaram uma redução de absorção de água de 36% em comparação com o grupo controle. Este resultado é a principal prova da eficácia do EVA como barreira hídrica. A presença do filme polimérico na superfície dos poros e das fibras reduz drasticamente a conectividade e o volume dos poros abertos, dificultando a penetração da água e, consequentemente, dos íons alcalinos.

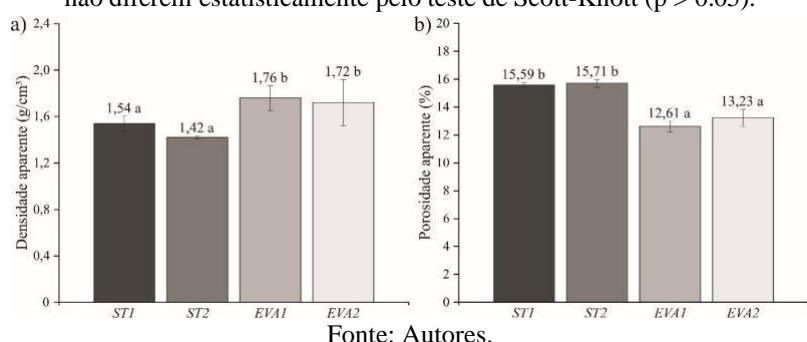
O mecanismo de proteção é, portanto, duplo:

**Macro-proteção:** O filme de EVA sela os poros superficiais da placa.

**Micro-proteção:** O EVA, ao revestir as nanofibras, cria uma capa protetora que impede o ataque direto da solução alcalina de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) sobre a celulose.

Este aumento na durabilidade é vital para aplicações externas do fibrocimento, onde a exposição cíclica à umidade e à secagem é a principal causa da degradação.

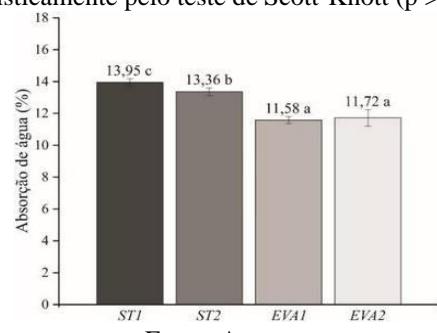
Figura 2 - Valores médios e desvio padrão da densidade aparente e porosidade aparente. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ( $p > 0.05$ ).



Fonte: Autores.

Este comportamento é coerente com a literatura, que aponta o EVA como um modificador que melhora a coesão e reduz a porosidade do compósito, favorecendo a durabilidade.

Figura 3 - Valores médios e desvio padrão da absorção de água. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ( $p > 0.05$ ).



Fonte: Autores.

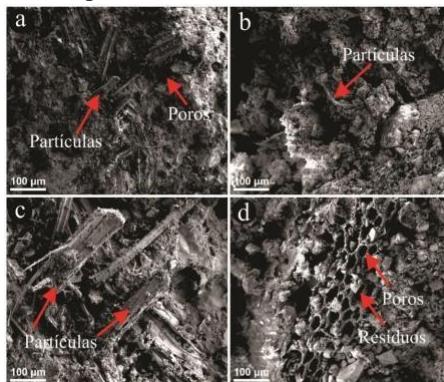
#### 4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL (MEV) DA ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL

O sucesso do compósito EVA2 está intrinsecamente ligado à sua microestrutura, conforme revelado pelas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A análise microestrutural é o ponto central desta pesquisa, fornecendo a validação do mecanismo de barreira proposto (NUNES, 2025).

#### 4.4 AMOSTRAS CONTROLE (NÃO TRATADAS)

As imagens de MEV do grupo controle revelaram interfaces fracas e com falhas. A Zona de Transição Interfacial (ZTI) era porosa, caracterizada pela presença de vazios e microfissuras entre a fibra de *E. poeppigiana* e a pasta de cimento. Em diversos pontos, observou-se claramente a precipitação de cristais de hidratação (como o hidróxido de cálcio e fases C-S-H) nos poros das fibras, um fenômeno conhecido como mineralização. Este ataque químico e a subsequente mineralização tornam a fibra rígida e frágil, transformando-a de um elemento flexível de reforço em um elemento rígido, o que explica a baixa tenacidade dos compósitos não tratados.

Figure 1 - MEV da fratura dos compósitos fibrocimento. (a) ST1; (b) ST2; (c) EVA1; e (d) EVA2



Fonte: Autores.

#### 4.5 AMOSTRAS EVA2 (ENCAPSULADAS)

Em contraste notável, as imagens de MEV do grupo EVA2 exibiram uma interface fibra- matriz altamente coesa. O filme polimérico de EVA foi inequivocamente identificado, cobrindo as fibras e penetrando na ZTI.

O EVA atua em duas frentes:

**Barreira Física:** O polímero forma uma camada contínua que impede a difusão dos íons alcalinos da matriz para a celulose. Isso inibe o processo de mineralização e degradação química, preservando a flexibilidade intrínseca da MNF.

**Promotor de Adesão:** A natureza polimérica do EVA melhora a aderência química e mecânica entre a fibra orgânica e a matriz inorgânica (cimento), promovendo uma transição de fase mais gradual. A transferência de tensão torna-se mais eficiente, o que se correlaciona diretamente com o aumento do



MOR (8,7 MPa) e a melhoria da tenacidade do material.

As microfissuras e vazios observados no grupo controle foram drasticamente reduzidos nas amostras EVA2, indicando que o EVA preencheu os poros interfaciais e funcionou como um "cimento polimérico" secundário, um achado que valida o modelo proposto para a proteção polimérica.

A correlação entre a microestrutura e o desempenho é clara: a redução da porosidade interfacial e a proteção contra a mineralização garantidas pelo EVA resultaram em um compósito mais denso, menos permeável (redução de 36% na absorção de água) e mecanicamente superior.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a viabilidade técnica e ambiental de um novo compósito de fibrocimento que integra nanofibrilas de *Erythrina poeppigiana* e resíduos Dregs, utilizando a extrusão como método de conformação. A estratégia-chave para a durabilidade foi o encapsulamento superficial com o Copolímero EVA.

Os resultados quantitativos comprovaram a eficácia do tratamento: o compósito otimizado (EVA2) atingiu 8,7 MPa de MOR e MOE  $> 4,9$  GPa, e apresentou uma significativa redução de 36% na absorção de água.

Mais importante, a análise microestrutural (MEV) validou o mecanismo de ação do polímero. As imagens de MEV demonstraram que o EVA forma uma barreira física coesa na interface fibra-matriz, protegendo a celulose do ataque alcalino e da mineralização. Essa coesão microestrutural é o fator que impulsionou o desempenho macroscópico, garantindo a durabilidade essencial para a longevidade em serviço.

O desenvolvimento deste material reforça a tese da Engenharia de Biomateriais aplicada à Economia Circular, oferecendo um substituto sustentável e de alta performance para o fibrocimento convencional na construção civil. Sugere-se a continuidade da pesquisa com ensaios de envelhecimento acelerado (imersão/secagem cíclica) para simular o desempenho a longo prazo.



## REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 9778:2020 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSANE, Lucia Maria Joaquim. *Produção de compósitos fibrocimentícios utilizando como reforço partículas de madeira de Erythrina poeppigiana*. 2024. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BELLO, R. H.; MEZAROBA, G.; CORREIA, S. L.; SCHACKOW, A. *Caracterização microestrutural de concretos com e sem resíduo da indústria de papel e celulose em substituição parcial ao cimento Portland*. In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2016, Águas de Lindóia – SP. *Anais...* Joinville: UDESC/CCT/PPGCEM, 2016.

FERREIRA, F. B. S. *Avaliação da utilização de resíduos de quartzito como agregado em microconcretos*. [S. l.]: Universidade Federal de São João del-Rei, 2017.

FERREIRA, P. *Utilização de EVA reciclado em matrizes cimentícias*. Salvador: EDUFBA, 2023.

NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

NUNES, Glauco Fernandes de Oliveira. *Fibrocimento com resíduos lignocelulósicos encapsulado com copolímero etileno acetato de vinila (EVA)*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2025.

OLIVEIRA, Yasmine Simões de. *Uso dos resíduos do processo kraft de celulose – dregs e grits – como adição mineral na produção de matrizes cimentícias*. 2022. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.477>