

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E MICROTETURAL DO FIBROCIMENTO: O PAPEL DA NANOTECNOLOGIA E DO EVA NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE *ERYTHRINA POEPPIGIANA* PARA REFORÇO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Glauco Fernandes De Oliveira Nunes 1 – Universidade Federal De Lavras (UFLA)
glauco.nunes@estudante.ufla.br

RESUMO

A substituição do amianto por materiais mais seguros e ecologicamente corretos é um desafio central na construção civil. Esta pesquisa propõe o uso de reforços lignocelulósicos derivados de resíduos de *Erythrina poeppigiana* como uma alternativa sustentável para compósitos cimentícios. O estudo abordou a incorporação desses resíduos em duas formas distintas – polpa microestruturada e nanofibrilas – que foram previamente encapsuladas em Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA). O encapsulamento visa a proteção das fibras e o aumento da durabilidade do material final, mitigando a degradação alcalina. Corpos de prova de fibrocimento foram moldados pelo processo de extrusão e submetidos a uma caracterização detalhada. As propriedades avaliadas incluíram densidade, porosidade e absorção de água, além de testes de propriedades mecânicas (resistência à flexão e compressão). A microestrutura dos compósitos foi investigada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados demonstraram que a incorporação sinérgica da polpa e das nanofibrilas tratadas com EVA levou a uma notável redução na absorção de água e na porosidade, acompanhada por um melhor desempenho mecânico em comparação com a matriz de controle. Conclui-se que a associação estratégica da polpa lignocelulósica, das nanofibrilas e do EVA representa uma abordagem eficaz para o desenvolvimento de compósitos cimentícios duráveis, de alto desempenho e alinhados com os princípios da sustentabilidade. **Palavras-chave:** Avaliação Estrutural 1; Compósitos Reforçados 2; Nanofibrilas de Celulose 3; EVA Modificação 4; Materiais Cimentícios 5.

ABSTRACT

The substitution of asbestos with safer, environmentally sound materials remains a key challenge in the civil construction sector. This research proposes the utilization of lignocellulosic reinforcements derived from *Erythrina poeppigiana* waste as a sustainable alternative for cementitious composites. The study focused on incorporating these residues in two distinct forms—microstructured pulp and nanofibrils—which were pre-treated by encapsulation in Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer (EVA). This encapsulation aimed to protect the fibers and enhance the durability of the final material by mitigating alkaline degradation. Fiber-cement samples were fabricated using the extrusion process and subjected to detailed characterization. Evaluated properties included density, porosity, and water absorption, in addition to comprehensive mechanical properties testing (flexural and compressive strength). The microstructure of the composites was examined via Scanning Electron Microscopy (SEM). Results indicated that the synergistic incorporation of the EVA-treated pulp and nanofibrils led to a noticeable reduction in water absorption and porosity, coupled with improved mechanical performance compared to the control matrix. It is concluded that the strategic combination of lignocellulosic pulp, nanofibrils, and EVA provides an effective methodology for developing high-performance, durable, and sustainable cementitious composites.

Keywords: Structural Evaluation 1; Reinforced Composites 2; Cellulose Nanofibrils 3; EVA Modification 4; Cementitious Materials 5.

1. Introdução

Nas últimas décadas, a valorização de resíduos do setor florestal tem ganhado destaque como um pilar da economia circular e da sustentabilidade ambiental (ALMEIDA, 2021). Diversas estratégias buscam aproveitar a biomassa residual, como a gestão e o expurgo de espécies não nativas ou indesejadas em áreas de cultivo, um procedimento essencial para o controle de invasoras e a manutenção do equilíbrio ecológico (BRAHMIA; HORVÁTH; ALPÁR, 2020).

Neste contexto, a *Erythrina poeppigiana*, frequentemente empregada como espécie sombreadora em culturas como o cacau, gera volumes significativos de resíduos lignocelulósicos que podem ser transformados em matéria-prima de valor (BATISTA *et al.*, 2025). O aproveitamento desses materiais se alinha à crescente demanda por compósitos cimentícios inovadores, especialmente os fibrocimentos reforçados com fibras vegetais. Esses materiais são tipicamente fabricados por processos como a extrusão e são constituídos por cimento Portland e reforços vegetais de granulometrias variadas (BATISTA *et al.*, 2025; BALCIUNAS *et al.*, 2018; BEZERRA *et al.*, 2006; ALPÁR *et al.*, 2011).

Os fibrocimentos vegetais são reconhecidos por suas múltiplas vantagens, incluindo baixo custo, boa resistência mecânica, estabilidade dimensional e um desempenho térmico e acústico favorável (BALCIUNAS *et al.*, 2015; BOLTRYK; PAWLUCZUK, 2013; ABDALLAH; ABDELGADIR, 2006; BEJÓ; TAKÁTS; VASS, 2005). Além disso, o uso de fibras vegetais permite a substituição do amianto, eliminando a necessidade de resíduos tóxicos no processo produtivo. Contudo, o principal desafio tecnológico desses compósitos reside na degradação das fibras celulósicas pelo meio altamente alcalino da matriz cimentícia, o que compromete a durabilidade a longo prazo (BOUVIER; CAMPANELLA, 2014; BHOWMICK; STEPHENS, 2000; AKHAVAN; CATCHMARK; RAJABIPOUR, 2018).

Para superar essa limitação, diversas estratégias de tratamento são aplicadas às fibras. O revestimento ou encapsulamento com polímeros, como o Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA), tem se mostrado eficaz. Este tratamento visa reduzir drasticamente a absorção de água, estabilizar quimicamente as fibras vegetais e, consequentemente, preservar as propriedades mecânicas e a durabilidade do compósito (ANTON, 2009).

Portanto, a exploração de resíduos florestais, como a biomassa da *Erythrina poeppigiana*, em combinação com a aplicação de tecnologias de modificação polimérica (EVA), representa uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável para a produção de fibrocimentos sustentáveis (ALFANI; GUERRINI, 2005; BARBOSA, 2022). O presente estudo se insere neste contexto, investigando

1. Referencial teórico

1.1. O Processo de Extrusão na Produção de Fibrocimento

A extrusão se estabeleceu na indústria de materiais como um método de moldagem eficiente e contínuo, ideal para a fabricação de produtos com geometrias complexas, como telhas, placas

de fachada e painéis de vedação (NAKAGAITO *et al.*, 2009). Embora seja uma técnica consolidada em diversos setores, sua aplicação na indústria de compósitos cimentícios é uma inovação mais recente que tem recebido crescente atenção (ALFANI; GUERRINI, 2005).

O princípio da extrusão baseia-se na compressão de uma massa plástica e sua passagem forçada por uma abertura calibrada (boquilha), conferindo ao material a seção transversal desejada (SOTO, 2010). Existem fundamentalmente dois tipos de equipamentos: as extrusoras de pistão, que operam de forma intermitente, e as extrusoras de rosca, preferidas por sua natureza contínua e maior produtividade. As extrusoras de rosca podem ser equipadas com câmaras de vácuo para otimizar a desaeração da mistura, resultando em menor porosidade do produto final (SOTO, 2010).

O desempenho do processo depende criticamente da geometria da rosca, das dimensões das câmaras de alimentação e compactação, e da boquilha, que não apenas define a forma final, mas também influencia o grau de compactação interna do material (SHAO, 1995). Manter uma velocidade de extrusão constante é crucial para minimizar variações de tensão e garantir a uniformidade do produto (CHEN; MURAKAMI, 2000).

Para a produção de fibrocimento, a extrusão oferece vantagens significativas sobre o método tradicional Hatschek (IKAI *et al.*, 2010). Sua natureza contínua permite a fabricação de perfis variados com equipamentos mais simples e reduz a geração de resíduos (TEIXEIRA *et al.*, 2012; SARACEVIC, 1995; FONSECA, 2016). Além disso, a alta compressão característica da extrusão viabiliza o uso de baixas relações água/cimento. Esta característica é vital, pois reduz o teor de produtos alcalinos livres ao redor das fibras, promove maior compactação e contribui para o aumento da resistência à fadiga do compósito durante o envelhecimento (NAKAGAITO *et al.*, 2009). Estudos de caso, como o de Pereira (2021) com fibrocimentos à base de quartzito, confirmaram que a extrusão resulta em menor porosidade e absorção de água. Embora promissora, a técnica ainda requer mais estudos sobre a durabilidade, o comportamento mecânico a longo prazo e, especialmente, a otimização da dispersão e orientação de reforços celulósicos na matriz (CLARAMUNT *et al.*, 2015; FONSECA *et al.*, 2016). Por essas razões, a extrusão se consolida como uma opção mais econômica e capaz de gerar produtos com propriedades comparáveis, ou superiores, aos obtidos por métodos tradicionais como Hatschek (MENDES, 2014; LU *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016; TEIXEIRA *et al.*, 2012).

1.2. Fibras Lignocelulósicas como Reforço em Matrizes Cimentícias

A utilização de fibras vegetais como reforço é uma alternativa técnica e sustentável ao amianto, especialmente relevante em economias em desenvolvimento devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e natureza renovável (MACVICAR; MATUANA; BALATINECZ, 1999; KHEDARI; WATSANASATHAPORN; HIRUNLABH, 2005). Essas fibras conferem aos compósitos cimentícios características desejáveis como menor massa específica, maior resistência à tração e ao impacto, além de um comportamento mais dúctil e melhor controle da fissuração, superando em alguns aspectos o amianto (AGGARWAL, 1995; COUTTS, 2005; TEIXEIRA, 2010; TONOLI *et al.*, 2013a).

O Brasil, com sua rica biodiversidade, possui grande potencial na exploração de fibras como sisal, bagaço de cana, coco, bambu, entre outras, que estão sendo pesquisadas para a substituição de reforços sintéticos (AGGARWAL, 1995; COUTTS, 2005; TEIXEIRA, 2010; TONOLI *et al.*, 2013a).

Dentre os reforços vegetais, a polpa de celulose oriunda de madeira ou plantas de ciclo curto se destaca por sua excelente dispersão na matriz, baixa densidade e propriedades morfológicas favoráveis (TONOLI *et al.*, 2010a; AGOPYAN *et al.*, 2005; KHORAMI; GANJIAN, 2011; AZWA *et al.*, 2013). Em comparação com fibras vegetais não processadas, a celulose processada apresenta menor teor de açúcares e lignina, minimizando a interferência nos mecanismos de hidratação do cimento (SAVASTANO Jr. *et al.*, 2000). O processo Kraft, em particular, depura parcialmente esses compostos, aumentando a compatibilidade química das fibras com o meio alcalino do cimento (MOHR; NANKO; KURTIS, 2005; JOAQUIM *et al.*, 2009).

Embora o uso da polpa Kraft seja consolidado em países desenvolvidos (SANTOS *et al.*, 2022), no Brasil, o potencial da celulose, como a de eucalipto, para a construção civil ainda está em fase de expansão, sendo a espécie promissora devido ao seu rápido ciclo de renovação (BRACELPA, 2014; TONOLI *et al.*, 2009a; TONOLI *et al.*, 2010b). A inserção dessas fibras melhora a absorção de energia do compósito, distribuindo microfissuras (FARRAPO *et al.*, 2017) e reduzindo a massa específica total (ESMERALDO, 2006).

A espécie *Erythrina poeppigiana* pertence à família Fabaceae e é tradicionalmente cultivada em sistemas agroflorestais (ROVEDA *et al.*, 2021). Seu uso como reforço em matrizes cimentícias ainda é pouco explorado, apesar de pesquisas recentes indicarem a viabilidade técnica e melhorias nas propriedades mecânicas de compósitos cimento-madeira que a incorporam (SANTOS *et al.*, 2024; ASSANE, 2024).

1.3. Resíduos de Polpa de Celulose (Dregs)

Os *dregs* são resíduos sólidos de caráter alcalino gerados na etapa de recuperação química do processo Kraft de fabricação de celulose (ALMEIDA *et al.*, 2007). Sua composição é predominantemente carbonato de cálcio (CaCO_3), contendo também traços de sódio (Na), magnésio (Mg) e ferro (Fe) (ALMEIDA *et al.*, 2007).

O alto pH e a composição química dos *dregs* motivaram pesquisas para seu reuso como forma de minimizar o impacto ambiental da indústria de celulose (MARTINS *et al.*, 2007). Na indústria da construção, a incorporação dos *dregs* em dosagens de concreto e compósitos tem sido explorada (GARCIA; COUTINHO, 2009). Esse material pode atuar como *filler* mineral, otimizando a compactação da mistura e, conseqüentemente, permitindo a redução parcial do consumo de cimento, o que é ambientalmente vantajoso ao diminuir as emissões de CO_2 (ZANELLA *et al.*, 2014).

A aplicação dos *dregs* está alinhada à economia circular, desviando o resíduo do descarte em aterros (MARQUES, 2013). A inclusão, em proporções adequadas, pode influenciar positivamente a trabalhabilidade e a durabilidade da matriz cimentícia, embora a otimização exija calibração precisa para garantir a compatibilidade química com o cimento (BAJPAI, 2015; KRIGSTIN; SAIN, 2006).

1.4. Nanofibrilas de Celulose

Como um avanço na valorização de resíduos lignocelulósicos como os da *Erythrina poeppigiana*, a extração de nanofibrilas de celulose (NFC) é uma área de grande interesse. As NFC são obtidas por refino de fibras vegetais via processos mecânicos, químicos ou enzimáticos (GOMES; PEREIRA; COSTA, 2023).

Estas nanofibrilas são caracterizadas por uma elevada razão de aspecto, alto grau de cristalinidade, estabilidade coloidal e grande área superficial específica (FONSECA *et al.*, 2019). Tais atributos as tornam excelentes reforços, pois atuam como "pontes" na microestrutura da matriz cimentícia, o que resulta em redução da porosidade, refinamento microestrutural e inibição da propagação de microfissuras.

A superfície das NFC, rica em grupos hidroxila, facilita a interação física com os produtos de hidratação do cimento, elevando a adesão e coesão interna sem interferir significativamente na alcalinidade do sistema (BATISTA *et al.*, 2024). A incorporação de NFC contribui para o aumento da resistência à tração na flexão, da tenacidade e da durabilidade, especialmente em compósitos com baixa relação água/cimento (CLARAMUNT *et al.*, 2015).

1.5. Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA)

O copolímero etileno-vinil-acetato (EVA) é um termoplástico versátil, obtido pela copolimerização de etileno e acetato de vinila, amplamente empregado em diversas indústrias (MARCILLA; BELTRÁN, 1995; MOTHE; TAVARES, 1997).

Suas propriedades distintivas incluem flexibilidade, impermeabilidade, uma textura emborrachada e excelentes propriedades adesivas, fazendo do EVA uma alternativa vantajosa a outros termoplásticos e borrachas sintéticas (ANTON, 2009). Setores como calçados, adesivos e embalagens são grandes usuários do polímero, que também é valorizado por ser atóxico, lavável e de fácil pigmentação (DE MEDEIROS, 2016; FERREIRA, 2023).

As características finais do EVA dependem diretamente da concentração de acetato de vinila em sua formulação; quanto maior o teor, mais elástico e semelhante à borracha será o comportamento do material (MARCILLA; BELTRÁN, 1995). No contexto da construção civil e da durabilidade de reforços vegetais, o EVA é crucial. Processos de encapsulamento por imersão utilizando EVA têm sido adotados como método seguro e eficiente para criar uma barreira polimérica nas fibras, protegendo-as do ataque alcalino e da absorção de umidade, e assim, aumentando a longevidade dos compósitos (MOTHE; TAVARES, 1997).

2. Método de pesquisa

2.1 Obtenção e Preparação dos Componentes

2.1.1 Biomassa e Resíduos

A madeira de *Erythrina poeppigiana* utilizada neste estudo foi obtida a partir de experimentos silviculturais conduzidos na Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), localizada em Ilhéus–BA. As toras foram transportadas para a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde foram seccionadas em blocos de 50 cm de comprimento (ASSANE, 2024).

Para otimizar o processamento, os segmentos de madeira passaram por um tratamento hidrotérmico, sendo submersos em água aquecida por 24 horas. Em seguida, foram laminados em um torno para obtenção de lâminas com espessura média de 2 mm. As lâminas foram então desintegradas em um moinho de martelo, gerando partículas do tipo *sliver* (SILVA, 2024). O material foi submetido à peneiramento utilizando malhas de 20 e 40 *mesh*, sendo selecionada e utilizada a fração retida na malha de 40 *mesh* para os procedimentos subsequentes (DIAS *et al.*, 2019).

Os *dregs*, um resíduo alcalino do processo Kraft de produção de celulose, foram fornecidos por uma indústria de papel e celulose no estado de São Paulo. Para padronização e redução de umidade, os *dregs* foram secos em estufa a 100 °C por 24 horas (BATISTA *et al.*, 2025).

2.1.2 Aditivo Polimérico

O Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA) foi fornecido por doação à UFLA. Este material, reconhecido por sua flexibilidade, baixa permeabilidade e notáveis propriedades adesivas, foi empregado como agente de revestimento e modificação nos compósitos de fibrocimento, justificando seu uso como alternativa a termoplásticos convencionais (BATISTA *et al.*, 2025).

2.2 Síntese das Nanofibrilas de Celulose

As partículas de *E. poeppigiana* foram inicialmente submetidas a um tratamento alcalino para remoção parcial de hemiceluloses e lignina, seguindo a metodologia adaptada de Dias *et al.* (2019). O material foi disperso em solução de NaOH a 5% (m/v), resultando em uma suspensão a 5% de partículas (m/v), e mantido sob agitação constante de 1500 rpm por 2 horas a 80 °C.

Após o tratamento químico, o material foi exaustivamente lavado com água deionizada até neutralização ($\text{pH} \approx 7,0$).

Posteriormente, o material foi submetido à fibrilação mecânica em um Supermasscolloider (Masuko Sangyo MKCA6-2), conforme o procedimento descrito por BATISTA *et al.* (2025). Foram executadas 40 passagens sob rotação de 1600 rpm até a obtenção de uma suspensão homogênea de nanofibrilas de celulose (NFC). A suspensão foi então filtrada para remover o excesso de água, produzindo uma pasta de NFC com teor de sólidos adequado para incorporação à matriz cimentícia.

2.3 Caracterização dos Materiais Lignocelulósicos

A madeira de *E. poeppigiana* foi caracterizada em sua composição química e física. Determinou-se a densidade básica (ABNT NBR 11941:2003), lignina insolúvel (ABNT NBR 7989:2010), extrativos totais (ABNT NBR 14853:2010) e cinzas (ABNT NBR 13999:2003). Os teores de celulose (KENNEDY *et al.*, 1987) e holocelulose (BROWNING, 1963) também foram medidos, sendo o teor de hemiceluloses calculado pela diferença entre estes.

Os *dregs* (resíduos alcalinos) foram analisados por fluorescência de raios X (FRX) em um equipamento S2 Picofox™. A preparação das amostras envolveu a suspensão do material em solução de Triton X-100 (5% v/v) e a adição de um padrão interno de gálio ($1,667 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). As leituras foram efetuadas em duplicata, com tempo de aquisição de 300 segundos por amostra.

2.4 Produção dos Compósitos de Fibrocimento

Os compósitos foram fabricados em escala laboratorial utilizando o método de extrusão, seguindo a metodologia de Batista *et al.* (2024). A formulação de referência (base) consistiu em 70% de cimento Portland CPV-ARI, 25% de calcário agrícola, 5% de partículas de madeira, 1% de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e 1% de aditivo superplastificante à base de policarboxilato (ADVA).

O plano experimental contemplou a substituição parcial das partículas de madeira por NFC e do calcário agrícola por *dregs*. As formulações originalmente previstas (Quadro 1) foram

reduzidas devido a desafios técnicos de trabalhabilidade e extrusão, resultando na produção efetiva de apenas dois tratamentos:

- ST1 (Controle): Formulação base sem o revestimento de EVA.
- EVA2: Compósito modificado (com NFC e *dregs*) e revestimento de EVA.

Quadro 1 Plano experimental de compósitos fibrocimento

Tratamento	Cimento (%)	Calcário (%)	<i>Dregs</i> (%)	Nanofibrilas (%)	Partículas (%)
ST1	70,0	25,0	–	–	5,0
EVA2	70,0	20,0	5,0	0,5	4,5

Fonte: elaborado pelo autor

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização Química e Física dos Materiais

3.1.1 Caracterização da Biomassa Lignocelulósica (*Erythrina poeppigiana*)

A Quadro 2 exibe os resultados da caracterização químico-física das partículas de *Erythrina poeppigiana*. Observa-se um teor de holocelulose de $65,7\%\pm$ e de celulose de $43,0\%\pm$, o que, juntamente com a densidade básica de $0,309\text{ g/cm}^3$, indica um potencial favorável para a aplicação em matrizes cimentícias.

Quadro 2 -Caracterização física e química das partículas de Eritryna

Análises	Partículas <i>in natura</i>
Extrativos totais	$8,7 \pm$
Lignina insolúvel	$23,0 \pm$
Celulose	$43,0 \pm$
Hemiceluloses	$22,8 \pm$
Holocelulose	$65,7 \pm$
Cinzas	$3,1 \pm$
Densidade básica (g/cm^3)	$0,309$

Fonte: elaborado pelo autor

3.1.2 Caracterização do Resíduo Alcalino (*Dregs*) e Polpa de Celulose

As Quadros 3 e 4 detalham a composição elementar do resíduo *Dregs* e da polpa de celulose utilizada no estudo. A presença de elementos químicos em concentrações variáveis exerce uma

influência significativa nos processos de hidratação e no desempenho final dos materiais cimentícios.

Quadro 3 Composição química dos Dregs

Al (mg/kg)	S (mg/kg)	P (mg/kg)	Mg (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Na (mg/kg)	B (mg/kg)
34448	19056,4	991,2	40280	9688,8	123502	558,8	269,6	18444	20

Observação: *LQ - menor que o limite de quantificação do método

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 3 – Composição química do *Dregs* (exceto N,Mn,Fe não detectados. *LQ* - menor que o limite de quantificação).

Quadro 4 Análise da Poupa de Celulose para Aplicações em Materiais Cimentícios

Elemento	Concentração
Alumínio (Al)	34.448,0 mg/kg
Enxofre (S)	19.056,4 mg/kg
Fósforo (P)	991,2 mg/kg
Magnésio (Mg)	40.280,0 mg/kg
Potássio (K)	9.688,8 mg/kg
Cálcio (Ca)	123.502,0 mg/kg
Nitrogênio (N)	Não disponível

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 4 – Análise de macroelementos da Polpa de Celulose para aplicações em materiais cimentícios.

Componentes em concentrações muito elevadas, como o Cálcio (123.502 mg/kg) e o Magnésio (40.280 mg/kg), podem atuar favoravelmente na hidratação do cimento, promovendo a formação do gel C-S-H e da etringita, compostos cruciais para a resistência e durabilidade estrutural. Por outro lado, o alto teor de Sódio e Potássio é notável, podendo alterar a reologia da mistura, impactando a trabalhabilidade e o tempo de pega do cimento.

O elevado teor de Mg é relevante, pois esse elemento contribui para a estabilidade química em diversas reações do cimento. Íons em quantidade considerável podem ainda afetar a condutividade iônica e as reações alcalinas, impactando a resistência final do compósito, especialmente em ambientes agressivos.

A análise de nutrientes, conduzida no Laboratório de Análise de Solo da UFLA sob a responsabilidade técnica de Márcio da Silva Marques (CRQ 02102206), confirma que a polpa possui potencial como aditivo cimentício. A combinação dessa polpa, rica em Ca e Mg, com as nanofibras de *Erythrina poeppigiana* tende a promover maior homogeneidade, resistência à fissuração e longevidade no compósito final. A não determinação de elementos como o N pode estar ligada ao limite de quantificação do método, não implicando, contudo, em um impacto direto nos processos cimentícios primários.

3.2 Caracterização Físico-Mecânica e Microestrutural

A Quadro 5 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas amostras selecionadas.

Quadro 5 Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE), Limite de Proporcionalidade e Tenacidade.

Parâmetro	T31	T32	T34
MOR (MPa)	101,86	101,86	101,86
MOE (MPa)	0,29	-0,28	1,65
Limite de Proporcionalidade (N)	0,00	0,12	0,35
Tenacidade (N·mm)	—	—	—

Fonte: elaborado pelo autor

3.2.1 Densidade Aparente e Porosidade

Os resultados médios para densidade aparente e porosidade não indicaram distinções estatisticamente significativas entre os tratamentos, de acordo com a análise de variância e o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

A aplicação superficial do EVA por imersão não comprometeu o grau de compactação dos compósitos, resultando em alterações favoráveis na densidade aparente (ZHANG *et al.*,

2022). Observou-se uma discreta redução na porosidade nas formulações tratadas com EVA (EVA1 e EVA2), sugerindo a atuação do polímero como uma barreira.

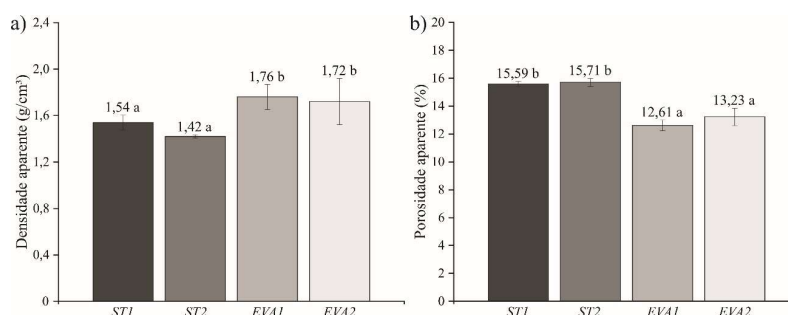
Essa constatação é consistente com a literatura, que descreve a aplicação do EVA como capaz de reduzir a porosidade da superfície e restringir a permeabilidade da matriz cimentícia, o que é um fator positivo para a durabilidade em ambientes agressivos (ZHANG *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2023). Portanto, as evidências físico-microestruturais indicam que o revestimento de EVA, aplicado externamente, resultou em uma modificação superficial benéfica sem afetar a integridade interna dos compósitos. Contudo, é importante ressaltar que a ausência de ensaios de durabilidade acelerada ou exposição prolongada exige que as inferências sobre longevidade sejam tratadas com cautela.

3.2.2 Absorção de Água

O comportamento da absorção de água seguiu a tendência observada na porosidade, com os tratamentos EVA1 e EVA2 apresentando valores ligeiramente inferiores em comparação ao controle, embora a diferença não tenha sido estatisticamente significativa.

A redução na absorção de água, mesmo que leve, demonstra o efeito do revestimento de EVA em limitar a penetração de agentes externos. Este resultado fortalece a eficácia do polímero como uma barreira protetora na superfície do compósito, o que favorece o desempenho do material em ambientes agressivos e contribui para um ganho de durabilidade sem prejuízo das propriedades físico-mecânicas essenciais (LI *et al.*, 2023).

Figura 1: 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: elaborado pelo autor

4. Considerações finais

O presente estudo demonstrou o elevado potencial de aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos da *Erythrina poeppigiana* como reforços sustentáveis em compósitos cimentícios processados por extrusão. A incorporação desses resíduos, tanto na forma de partículas microfibrilares quanto de nanofibrilas de celulose (NFC), comprova uma rota técnica viável para a valorização de subprodutos florestais.

O revestimento superficial dos corpos de prova pelo Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA), realizado por imersão após a cura, mostrou-se uma estratégia eficaz. O polímero atuou como uma barreira protetora para as fibras vegetais contra o ataque do meio alcalino da matriz de cimento Portland, o que resultou na redução da porosidade e da absorção de água, além de conferir maior estabilidade dimensional aos compósitos.

Embora não tenham sido realizados ensaios acelerados de resistência à alcalinidade, a avaliação físico-mecânica e microestrutural das amostras indicou a preservação da integridade das fibras e a obtenção de um incremento na tenacidade do material. O método de encapsulamento por imersão em banho também se destacou, apresentando vantagens em termos de racionalidade técnica e econômica em comparação com métodos alternativos de aplicação, como a pintura.

Conclui-se que a formulação otimizada, que associa cimento CPV-ARI, Dregs (resíduo alcalino), fibras vegetais e o modificador EVA, não apenas atende aos critérios de viabilidade técnica para a produção de fibrocimento por extrusão, mas também se mostra ambientalmente promissora. Os resultados obtidos abrem caminhos para futuras aplicações inovadoras na construção civil, incluindo o desenvolvimento de técnicas de extrusão adaptada e o uso em processos de impressão 3D.

Agradecimentos

O autor agradece ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Prof. Dr. Lourival Marin Mendes Orientador; Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior Coorientador, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

BURGESS, K.; SINGH, P. J.; KOROGLU, R. Supply chain management: a structured literature review and implications for future research. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 26, n. 7, p. 703–729, 2006.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

AKHAVAN, A.; CATCHMARK, J. M.; RAJABIPOUR, F. Ductility enhancement of autoclaved cellulose fiber reinforced cement boards manufactured using a laboratory method simulating the Hatschek process. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 135, p. 251–259, 2018.

ALFANI, R.; GUERRINI, G. L. Rheological test methods for the characterization of extrudable cement-based materials: a review. **Materials and Structures**, London, v. 38, n. 2, p. 239–247, mar. 2005.

ALMEIDA, R. *Aplicações sustentáveis de resíduos na construção civil*. São Paulo: EdUFSCar, 2021.

ANTON, J. J. Avaliação térmica, mecânica e morfológica de incorporação de nanopartícula de sílica coloidal em matriz de poli (etileno-co-acetato de vinila). 2009. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ASSANE, Lucia Maria Joaquim. Produção de compósitos fibrocimentos utilizando como reforço partículas de madeira de *Erythrina poeppigiana*. 2024. 53 f. Dissertação (Mestrado em Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2024. Orientador: Lourival Marin Mendes. Coorientador: Lorrán de Sousa Arantes.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941:2003 – Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13999:2003 – Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14853:2010 – Madeira – Determinação do teor de extrativos totais. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15498:2016 – Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15498:2021 – Telhas de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7989:2010 – Pasta celulósica e madeira – Determinação do teor de lignina insolúvel. Rio de Janeiro, 2010.

BALCIUNAS, G.; PUNDIENE, I.; LUKOSIUNE, L. L.; VEJELIS, S.; KORJAKINS, A. Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical–mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. **Industrial Crops and Products**, v. 77, p. 724–734, 2015.

BARBOSA, M. D. S. *Desenvolvimento de compósitos para impressão 3D com consumo de cimento reduzido*. [S. l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

BEJÓ, L.; TAKÁTS, P.; VASS, N. Development of cement bonded composite beams. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, v. 1, p. 111–119, 2005.

BOUVIER, J. M.; CAMPANELLA, O. H. *Extrusion Processing Technology: Food and Non-food Biomaterial*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2014.

BROWNING, B. L. *Methods of Wood Chemistry*. New York: Interscience Publishers, 1963.

CARVALHO, A. F.; SILVA, M. A.; PEREIRA, L. F. Estabilidade das fibras vegetais em compósitos cimentícios: desafios e soluções. *Revista Brasileira de Engenharia de Materiais*, v. 45, n. 2, p. 134–142, 2024.

COSTA, M. H. A. Caracterização mecânica e simulação numérica de concreto de alto desempenho reforçado com fibras metálicas. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/46630> **ZHANG, Y. et al.** Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 278–285, mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818330356>. Acesso em: 04 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>.