



ANIELLY PACHECO CUSTÓDIO VILLELA

**PAINÉIS DE CIMENTO MADEIRA DE *ERYTHRINA*
POEPPIGIANA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE
CARBONATAÇÃO ACELERADA**

**LAVRAS - MG
2023**

ANIELLY PACHECO CUSTÓDIO VILLELA

**PAINÉIS DE CIMENTO MADEIRA DE *ERYTHRINA POEPPIGIANA* SUBMETIDOS
AO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Engenharia de Biomateriais, para a obtenção do título de Mestra.

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior
Orientador

Prof. Dr. Adriano Galvão de Souza Azevedo
Coorientador

Prof. Dr. Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

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

Villela, Anielly Pacheco Custódio.

Painéis de cimento madeira de *Erythrina Poepigiana* submetidos ao processo de carbonatação acelerada / Anielly Pacheco Custódio Villela. - 2023.

46 p.

Orientador(a): José Benedito Guimarães Júnior.

Coorientador(a): Adriano Galvão de Souza Azevedo, Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Tratamento com água quente. 2. Carbonatação acelerada. 3. *Erythrina Poepigiana*. I. Júnior, José Benedito Guimarães. II. Azevedo, Adriano Galvão de Souza. III. Mesquita, Ricardo Gabriel

ANIELLY PACHECO CUSTÓDIO VILLELA

**ERYTHRINA POEPIGGIANA WOOD CEMENT PANELS SUBMITTED TO
ACCELERATED CARBONATION PROCESS**

**PAINÉIS DE CIMENTO MADEIRA DE *ERYTHRINA POEPIGGIANA* SUBMETIDOS
AO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Engenharia de Biomateriais, para a obtenção do título de Mestra.

APROVADA em 27 de julho de 2023.

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior - Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes - Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Prof. Dr. Mário Vanoli Scatolino - Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Adriano Galvão de Souza Azevedo - Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita - Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB)

**LAVRAS - MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Início os agradecimentos a Deus e a Beata Nhá Chica por ter me mantido de pé durante esse período do mestrado.

Aos meus pais, Cristiano e Ana Paula, que nunca cessaram em me ajudar a conquistar meus objetivos, que sempre me incentivaram, a eles eu devo tudo que sou hoje.

Aos amigos que conheci durante essa trajetória, e aos técnicos de laboratórios que foram fundamentais para essa realização. Em especial: Ianca Borges, Lorrán Arantes e Henrique Andrade.

Ao meu orientador, José Benedito, e aos meus coorientadores Adriano e Ricardo, por todos os ensinamentos e conhecimentos passados para a realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBiomat) pela oportunidade.

Ao financiamento WRI Brasil e Instituto Arapyaú, a gestão dos recursos PCTSB – Parque Científico e Tecnológico do Sul da Bahia e a parceria que tivemos com a Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) – Centro de Formação em Ciências Agrofloretais (CFCAf).

E a todos que de alguma forma estiveram e está próximo a mim ao longo desses anos, torcendo e rezando pelas minhas conquistas.

RESUMO GERAL

Os painéis cimento-madeira são compostos por uma mistura de cimento, partículas de madeira, água e aditivos que são prensados e curados formando placas rígidas e resistentes. Esses painéis podem ser utilizados em diversas aplicações, como revestimentos de parede, pisos, divisórias e móveis. Podem ser fabricados utilizando partículas de madeira de menor valor comercial, como serragem e aparas que poderiam ser descartadas como resíduos, contribuindo para a redução do desperdício na indústria madeireira. Um dos processos que podem ser aplicados para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas, tornando-os mais duráveis e resistentes às condições adversas é a carbonatação acelerada, que consiste em introduzir dióxido de carbono (CO₂) de forma controlada em materiais à base de cimento com o objetivo de acelerar o processo natural de carbonatação. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver, produzir e caracterizar painéis cimento-madeira da espécie *Erythrina poeppigiana*, bem como avaliar os efeitos da cura com carbonatação acelerada e tratamento com água quente nas propriedades dos painéis. A espécie em questão é exótica, possui baixa resistência e está sujeita ao apodrecimento rapidamente, o que inviabiliza sua aplicação como madeira sólida. Com isso, tornou-se importante avaliar a viabilidade como constituinte de painéis cimento-madeira. Foram produzidos painéis experimentais com densidade nominal de 1,25 g/cm³, utilizando cimento CP V ARI como aglutinante mineral e o cloreto de cálcio (CaCl₂) como aditivo químico. A carbonatação acelerada proporcionou aos painéis cimento madeira melhores propriedades físicas e mecânicas, sendo atendidos todos os requisitos de qualidade da norma de Bison. O tratamento com água quente diminuiu o teor de extrativos e melhorou a interação das partículas de *Erythrina spp.* com o cimento, reduzindo a porosidade, inchamento em espessura e absorção de água dos painéis cimento madeira. O tratamento T3 e T4 apresentaram redução, quando comparadas ao controle, quanto a essas propriedades mencionadas. A carbonatação acelerada proporcionou aos painéis cimento madeira de *Erythrina spp.* melhores propriedades físicas e mecânicas, sendo atendidos todos os requisitos de qualidade da norma de Bison. O tratamento T4 apresentou melhor MOR (14,80 MPa) e o T3 indica aumento significativo para o MOE em relação ao controle (2515,24 MPa para 4030,24 MPa). É viável tecnicamente a utilização da madeira de *Erythrina spp.* para produção de painéis cimento-madeira, fato que pode permitir agregação de valor e destinação adequada para esta espécie.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos. Duráveis e resistentes. Tratamento com água quente. Resistência mecânica.

ABSTRACT

Cement-wood panels are composed of a mixture of cement, wood particles, water and additives that are pressed and cured to form rigid and resistant plates. These panels can be used in various applications, such as wall coverings, floors, partitions and furniture. They can be manufactured using wood particles of lower commercial value, such as sawdust and shavings that could be discarded as waste, contributing to the reduction of waste in the wood industry. One of the processes that can be applied to improve their physical and mechanical properties, making them more durable and resistant to adverse conditions is accelerated carbonation, which consists of introducing carbon dioxide (CO₂) in a controlled manner into cement-based materials with the aim of accelerating the natural carbonation process. The present work aimed to develop, produce and characterize cement-wood panels of the species *Erythrina poeppigiana*, as well as evaluate the effects of curing with accelerated carbonation and hot water treatment on the properties of the panels. The species in question is exotic, has low resistance and is subject to rotting quickly, which makes its application as solid wood unfeasible. Therefore, it became important to evaluate the viability as a constituent of wood-wood panels. Experimental panels were produced with a nominal density of 1.25 g/cm³, using CP V ARI cement as a mineral binder and calcium chloride (CaCl₂) as a chemical additive. Accelerated carbonation provided the wood cement panels with better physical and mechanical properties, meeting all the quality requirements of the Bison standard. Hot water treatment decreased the extractive content and improved the interaction of *Erythrina* spp. with cement, reducing the porosity, swelling in thickness and water absorption of cement-wood panels. The T3 and T4 treatments showed a reduction, when compared to the control, in terms of these properties mentioned. Accelerated carbonation provided cement panels with wood from *Erythrina* spp. better physical and mechanical properties, meeting all the quality requirements of the Bison standard. Treatment T4 showed better MOR (14.80 MPa) and T3 indicates a significant increase in MOE in relation to the control (2515.24 MPa to 4030.24 MPa). It is technically viable to use wood from *Erythrina* spp. for the production of cement-wood panels, a fact that can allow added value and appropriate destination for this species.

KEYWORDS: Waste. Durable and resistant. Hot water treatment. Mechanical resistance.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	OBJETIVOS	9
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1	Painel Cimento Madeira.....	9
3.2	Madeira e sua aplicação em painéis minerais	15
3.3	Madeira <i>Erythrina poeppigiana</i>	16
3.4	Cimento Portland	17
3.5	Processo de cura com a carbonatação acelerada	18
3.6	Considerações sobre a revisão bibliográfica	21
	REFERÊNCIAS	22
	EFEITO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA NAS PROPRIEDADES DE PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA DA ESPÉCIE <i>Erythrina poeppigiana</i>	27
1.	INTRODUÇÃO	28
2.	MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1.	Matéria-prima.....	29
2.2.	Tratamento com água quente	29
2.3.	Caracterização da madeira	30
2.4.	Produção dos painéis cimento madeira	30
2.5.	Carbonatação Acelerada.....	31
2.6.	Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis	32
2.7.	Análise microestrutural	32
2.8.	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	32
2.9.	Análise por termogravimetria.....	33
2.10.	Análise dos resultados.....	33
3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
3.1	Caracterização da madeira	33
3.2	Propriedades físicas.....	34
3.3	Propriedades mecânicas	37
3.4	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	39
3.5	Termogravimetria.....	40
4.	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

O interesse por materiais compostos por cimento e madeira foi restaurado na década de 1960 devido à restrição do uso de amianto. Esse tipo de painel está correlacionado à disponibilidade das matérias primas naturais, e do seu baixo impacto ambiental, quando comparado com outros materiais sintéticos.

Esses painéis vêm ganhando destaque na construção civil possuem propriedades físicas, acústicas, térmicas, resistência ao fogo, resistência à degradação biológica e durabilidade que atendam as diretrizes mínimas estabelecidas pelos documentos normativos internacionais e superiores aos painéis produzidos com matriz orgânicas, além de ser um produto com baixo custo (QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016). E pode-se mencionar ainda, que a presença de fibras de madeira tem uma enorme vantagem em melhorar as propriedades mecânicas da matriz cimentícia (Li *et al.*, 2019).

A madeira é uma matéria-prima de origem natural e renovável que requer um mínimo de transformação na produção de painéis. Segundo Leborgne e Gutkowski (2010), a introdução da madeira em materiais de construção tem a vantagem de reduzir parcialmente o teor de cimento. O uso de madeira em materiais cimentícios também pode otimizar as propriedades de flexão e o comportamento pós-quebra. É uma matéria-prima alternativa para materiais de reforço usuais, como fibra de vidro, polipropileno e fibra de aço (PAGE *et al.*, 2017).

De acordo com Iwakiri (2012), os painéis cimento-madeira são amplamente utilizados em construção civil nos países da Europa e Japão, em função de suas características adequadas para aplicações estruturais. No Brasil, esse material ainda não é muito explorado, principalmente por questões culturais de priorizar as construções em alvenaria. Entretanto, esse cenário pode ser mudado gradativamente, por meio de políticas governamentais voltadas para construção de habitações sociais e das iniciativas dos profissionais da área de construção civil.

Apesar de os painéis cimento-madeira apresentarem diversas vantagens quando se comparado aos painéis produzidos com matriz orgânica, a problemática que se encontra, nesses materiais, é a sua baixa durabilidade, e a principal razão para isso está atrelada a mineralização da madeira quando exposta ao meio alcalino da matriz cimentícia (pH~13) (AMZIANE; SONEBI, 2016). Ainda, de acordo com os autores Amziane e Sonebi (2016), essa mineralização consiste na reprecipitação dos produtos de hidratação do cimento no interior das partículas de madeira. Essa região possui uma porosidade elevada, com isso,

permite um alto acúmulo da solução da água com produtos alcalinos, como exemplo, pode-se citar o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ele atua degradando as partículas da madeira e com isso, compromete o desempenho como um agente de reforço nos painéis.

Em razão da redução da alcalinidade e da densificação da matriz cimentícia a cura por meio da carbonatação acelerada tem mostrado resultados satisfatórios para minimizar os efeitos do cimento, e assim tornar o meio menos agressivo para as partículas de madeira. Contudo, até o momento não existem trabalhos avaliando a utilização da madeira *Erythrina poeppigiana* em painéis cimento-madeira. Sendo assim, esse trabalho objetivou a utilização de uma madeira exótica para produção de painéis cimento-madeira, testando assim a qualidade desses painéis com a utilização desse tipo de madeira, e ainda estudar os efeitos da carbonatação acelerada nos painéis.

2. OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo desenvolver painéis cimento-madeira, utilizando a madeira da espécie conhecida popularmente como eritrina (*Erythrina poeppigiana*), e estudar os efeitos da carbonatação acelerada nesses painéis. Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a qualidade dos painéis produzidos a partir da madeira exótica *Erythrina poeppigiana*, madeira ainda não explorada para a produção desses painéis;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis após a exposição dos corpos-de-prova no processo de carbonatação acelerada;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis nos quais as partículas foram submetidas ao tratamento com água quente;
- Avaliar a viabilidade para a destinação da madeira *Erythrina Poeppigiana* na produção de painéis cimento-madeira.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

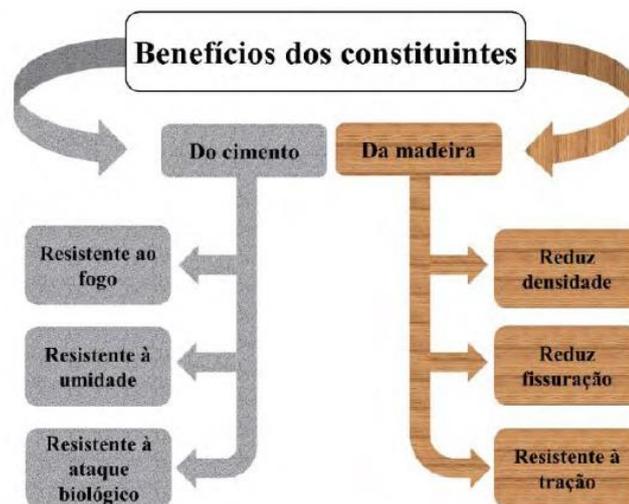
3.1 Painel Cimento Madeira

O compósito cimento-madeira pode ser definido como um material composto por dois ou mais constituintes, que possui uma fase reforçada, em que as partículas de madeira estão envolvidas por uma fase ligante, o cimento. A água é um componente essencial para a mistura e ligação destas fases na formação do compósito. Na fase ligante, o cimento transmite o esforço entre as partículas de madeira, mantendo-as protegidas do meio e permitindo sua orientação apropriada. Por sua vez, a madeira, além de aumentar a resistência à tração, contribui para redução da densidade e do custo (VILLAS-BÔAS & IWAKIRI, 2017).

Existem várias pesquisas que estão correlacionando compósitos de cimento com fibras, e isso tem evoluído bastante, devido a enorme procura das pessoas em utilizar materiais mais sustentáveis, que possui um custo baixo, uma baixa densidade. Nos dias de hoje, a influência das fibras no desempenho mecânico e na durabilidade desses compósitos que limita a propagação do seu uso (ONUAGULUCHI & BANTHIA, 2016).

O cimento portland passou a ser a matriz inorgânica mais empregada, em virtude dos melhores resultados sobre as propriedades físicas e mecânicas desses painéis (FRYBORT *et al.*, 2008). Com isso, os painéis cimento-madeira apresentaram boa aceitação mundial, por causa das junções das propriedades do cimento e da madeira, conforme ilustra na Figura 1.

Figura 1. Benefícios dos constituintes dos painéis cimento-madeira modificado



Fonte: Lipinski, 1994.

O compósito de madeira com cimento tem muitas vantagens, sobre outros materiais de madeira convencional. Isso inclui um melhor isolamento e desempenho do fogo, melhor resistência à imersão em água, melhores propriedades para prevenir os microrganismos, ou seja, ataque de fungos e insetos, e uma maior rigidez. Quando comparamos com o concreto, esse tipo de compósito pode reduzir o custo do material, reutilizar resíduos de madeira e melhor também o desempenho (FAN *et al.*, 2012). Mais algumas vantagens, podemos mencionar é que substitui as chapas de cimento amianto (TEIXEIRA, 2012); possui vasta disponibilidade da matéria-prima renovável, isso possibilita o aproveitamento de subprodutos vegetais (IWAKIRI *et al.*, 2015), possui uma excelente trabalhabilidade, podendo ser serrado e furado (SÁ *et al.*, 2010), não possui emissão de resíduos tóxicos durante a sua produção, além do emprego do material ligante inerte e com menores riscos à saúde dos trabalhadores da linha de produção (VAN ELTEN, 2006).

Para realizar a produção desses painéis utilizam-se aditivos químicos que tem a função de atuar diretamente no endurecimento do cimento, e com isso facilita a formação dos produtos hidratados, impedindo assim a ação dos agentes de inibidores da hidratação presentes na madeira (SILVA *et al.*, 2006; ZUCCO, 1999). Existem vários aditivos que são utilizados, sendo eles o cloreto de cálcio, o cloreto de magnésio, sulfato de alumínio, silicato de potássio e o silicato de sódio (CASTRO *et al.*, 2014; IWAKIRI *et al.*, 2012b). Porém, o aditivo que vem sendo mais utilizado é o cloreto de cálcio, por causa da sua eficiência durante a aceleração da hidratação dos silicatos de cálcio, principalmente a alita (C3S), e também por ele possuir um baixo custo (AGGARWAL *et al.*, 2007; ATOYEBI; AWOLUSI; DAVIES, 2018; IWAKIRI *et al.*, 2012b).

A incompatibilidade madeira-cimento pode limitar a aplicação prática de espécies de madeira em compósitos de cimento com madeira. Em alguns estudos foi verificado que a compatibilidade desse tipo de compósito varia dentro das diferentes espécies de madeira. Então, conclui-se que o nível de compatibilidade deve ser avaliado para identificar se a madeira é adequada para a produção desses compósitos. Atualmente, tem alguns métodos para classificar a madeira de diversas espécies quanto a sua compatibilidade com o cimento com base no seu calor de hidratação, temperatura, força, condutividade elétrica e morfologia (NA *et al.*, 2014). Ainda segundo o autor, para conseguir adequar algumas espécies de madeira para a fabricação de cimento-madeira como placas, é comum adicionar produtos químicos inorgânicos, mais conhecidos como aceleradores, para acelerar a cura do cimento ou, usar os pré-tratamentos, como extração aquosa com a função de remover os inibidores das substâncias de madeiras.

As propriedades mecânicas dos compósitos cimento-madeira podem ser influenciadas por variáveis como: espécies florestais, características físico-químicas, granulometria e geometria das partículas, tipo de cimento, presença de eventuais aditivos, proporção de água, temperatura do ambiente e o tempo de reação para hidratação do cimento (GARCEZ *et al.*, 2016).

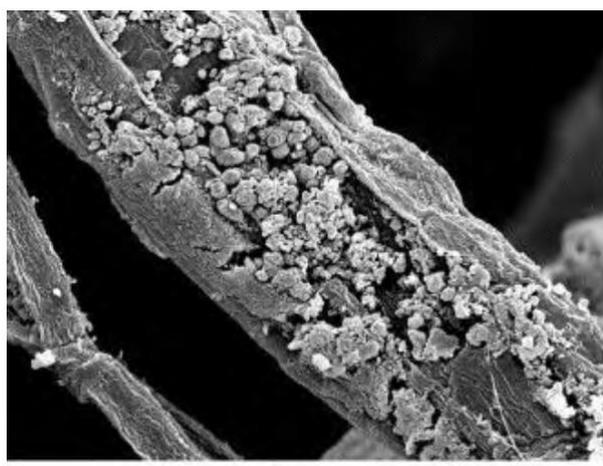
A adição da madeira pode interferir nas reações de hidratação do cimento, e isso causa uma desaceleração do tempo da solidificação. Devido, a capacidade em que a madeira tem de absorver água, e isso pode afetar o equilíbrio da reação, resultando em painéis cimento-madeira de baixa qualidade (DIQUÉLOU *et al.*, 2016; FAN *et al.*, 2012). Além disso, pode-se mencionar que a dissolução das hemiceluloses e extrativos da madeira pode interferir também na hidratação do cimento. Quando esses componentes são dissolvidos, podem formar uma camada protetora nos grãos de cimento parcialmente hidratados, e essa camada forma uma

barreira sobre o cimento, que dificulta a formação dos produtos de hidratação (GARCI JUENGER; JENNINGS, 2002).

Com isso, considerando esses aspectos negativos com relação à interação da madeira e do cimento, os estudos sugeriram o uso de tratamentos para diminuir a absorção de água, como os teores de hemiceluloses e os extrativos (BILCATI *et al.*, 2018; FERRAZ *et al.*, 2011b; MOSLEMI; GARCIA; HOFSTRAND, 1983; QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016). Dentre os tratamentos utilizados para melhorar a interação da madeira com o cimento, pode ser destacado o tratamento com água quente (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004).

Além desse aspecto relacionado aos efeitos da madeira na hidratação do cimento Portland, pode-se citar a mineralização de partículas, que é um importante mecanismo de degradação, isso ocorre porque o hidrofílico aspecto da matéria vegetal resulta no acúmulo dos íons no lúmen dos cimentos de fibras, conforme mostra a Figura 2. Com isso, esses mecanismos irão prejudicar a interação do reforço com a matriz, e assim prejudica o aspecto dúctil das partículas, onde as partículas apresenta um comportamento frágil, afetando a função de reforço na matriz, ou seja, a durabilidade do composto (WEI *et al.*, 2016; TEIXEIRA *et al.*, 2020). Nesse contexto, a carbonatação acelerada representa uma alternativa para o aumento da durabilidade da madeira no meio alcalino (ALMEIDA *et al.*, 2013; BERTOS *et al.*, 2004; SAVASTANO; WARDEN; COUTTS, 2000).

Figura 2. Micrografia material vegetal mineralizado



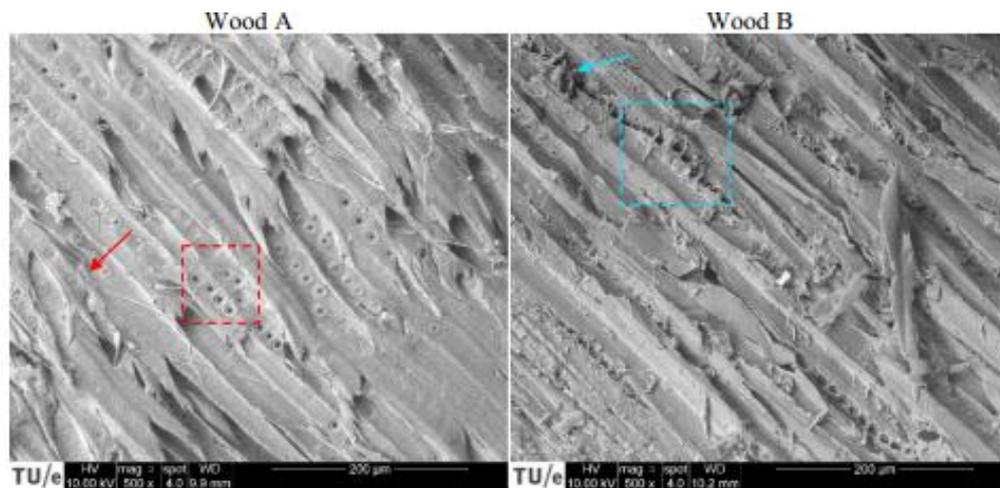
Fonte: Ardanuy *et al.*, 2015.

No trabalho de Fan *et al.* (2012), os autores estudaram a utilização de 15 espécies de madeiras tropicais na produção de compósitos cimento/madeira. Eles concluíram que, carboidratos que possui um baixo peso molecular e a presença de hemiceluloses, contribuem

com a inibição das reações de hidratação do cimento, promovendo regiões com baixa adesão entre a madeira e o ligante inorgânico. Madeiras de diferentes espécies interferem de formas distintas nas reações de hidratação. O aumento da porcentagem de material lignocelulósicos promove alterações nas propriedades mecânicas dos compósitos fabricados. Entretanto, a taxa de interferência é severamente influenciada pelo tipo de madeira utilizada na construção dos materiais.

Já no trabalho de Kochova *et al.* (2020), eles avaliaram a influência de dois tipos de madeiras comerciais utilizadas na confecção de placas cimento/madeira utilizadas largamente na Europa. As amostras, classificadas como madeira A e madeira B, foram quimicamente analisadas para a detecção da quantidade total de açúcares em cada amostra e sua consequente influência nas propriedades finais dos compósitos. As análises químicas demonstraram que as amostras apresentaram concentrações de açúcares próximas de 150 e 410 mcg/mL, para as amostras A e B, respectivamente. Os resultados de resistência mecânica das amostras produzidas com a madeira A se demonstraram muito acima do limite mínimo da norma, enquanto as amostras de compósitos fabricados com a madeira B não atingiram os valores mínimos necessários. Os autores avaliaram a superfície das amostras por meio do MEV e obtiveram resultados interessantes sobre as diferentes amostras de madeira, como observado na Figura 3.

Figura 3. Análises das superfícies das madeiras utilizadas na produção dos compósitos cimento/madeira



Fonte: Kochova *et al.*, 2020.

As imagens de MEV revelaram que a madeira apresenta uma morfologia mais homogênea, o que, de acordo com os autores, favorece a melhor adesão entre a matriz e o reforço durante a fabricação dos compósitos.

No trabalho desenvolvido por Berger *et al.* (2020), os autores investigaram a utilização de madeiras provenientes de processos de demolição. Os autores realizaram a caracterização dos materiais e demonstraram que a reciclagem de madeira de demolição em processos de fabricação de compósitos de matriz cimentícia é uma solução viável para o crescente aumento desta classe de resíduos urbanos.

A pesquisa desenvolvida por Asante *et al.* (2021), os autores fabricaram compósitos utilizando material álcali ativado a base de cinza volante e reforço de madeira. Os pesquisadores avaliaram a influência da granulometria da cinza volante e do pré-tratamento das partículas de dois tipos de madeiras na propriedade mecânica dos compósitos. Com o intuito de se entender as interações das superfícies das partículas com a matriz inorgânica, os pesquisadores realizaram o tratamento das partículas de madeira com banho quente para remoção de extratos que comumente afetam a aderência (cimento/madeira) neste tipo de compósito. Os resultados demonstraram que o pré-tratamento com banho quente pouco influenciou nas propriedades mecânicas dos materiais produzidos. Entretanto, um aumento na reatividade da cinza volante foi alcançado com a moagem, promovendo um acréscimo de 50% nos valores de resistência mecânica. Os autores relatam que, além das madeiras utilizadas no estudo, a produção dos compósitos pode ser realizada pela utilização de bagaço e fibras de bambu, o que intensifica o caráter sustentável dos compósitos fabricados.

No trabalho de Villas-Bôas e Iwakiri (2017) os autores avaliaram o efeito da interação entre as dimensões das partículas de madeira de *Pinus spp* e a velocidade da mesa vibratória na resistência mecânica do compósito cimento-madeira. Os corpos de prova foram no formato cilíndricos para avaliação da resistência a compressão axial foram confeccionados com cinco diferentes dimensões de partículas e duas velocidades de moldagem (220 N/3.000 rpm e 440 N/3.600 rpm), por processo de vibro-compactação. Os ensaios de compressão axial dos corpos de prova confeccionados com as partículas menores, passantes na peneira de #4,75 mm e retidas na de #2,36 mm, foram mais resistentes em comparação às partículas com maiores dimensões. Quanto à velocidade da mesa vibratória, os compósitos de cimento-madeira produzidos com velocidade de 220 N a 3.000 rpm, foram mais resistentes à compressão axial em relação aos compósitos produzidos com velocidade de 440 N a 3.600 rpm.

Na pesquisa de Li *et al.* (2019), eles apresentaram uma investigação sobre o uso de painéis de madeira-cimento como fôrma fixa ou permanente. Em se tratando de painéis individuais, o desempenho mecânico foi avaliado por meio de testes de flexão em três pontos. O desempenho estrutural geral foi avaliado por meio de simulação de elementos finitos sob a

ação da pressão que foi exercida pelo concreto no estado líquido. Os resultados que foram obtidos mostraram que painéis compostos de madeira-cimento oferecem uma alternativa promissora, principalmente quando se trata de o desenvolvimento de fôrma permanente leve, para poder assim, contribuir para o sistema térmico e conforto acústico.

Os compósitos que são envolvidos apresentam variações nas suas resistências mecânicas, nas propriedades físicas. Tendo observado vários estudos, é evidente que a madeira altere as reações químicas do Cimento Portland, por isso é importante saber qual tipo de madeira será utilizado. Em relação ao uso de aditivos e a realização de um pré-tratamento na superfície das fibras, pode-se observar que promoveu uma melhoria na adesão destas na matriz cimentícia e, conseqüentemente, promoveu uma melhor transferência de energia entre a matriz e o reforço durante os ensaios.

3.2 Madeira e sua aplicação em painéis minerais

A madeira simboliza um dos materiais mais leves e sustentáveis da construção, empregando um lugar necessário no desenvolvimento da história dos materiais e processos construtivos, continuando ainda hoje a dar frutos das suas mais valias. É um material de engenharia de muito valor e, em maioria dos casos, os avanços tecnológicos tornaram-no ainda mais útil. Os fatores inerentes que mantêm a madeira na primeira linha das matérias-primas são vastos e variados, mas um atributo principal é sua disponibilidade em muitas espécies, tamanhos, formas e condições para atender a quase todas as necessidades. A madeira tem uma alta relação entre resistência e massa e um registo notável de durabilidade e desempenho como material estrutural (PARRACHA, 2018).

Quando seca, a madeira tem ótimas propriedades de isolamento térmico, acústico e de condutibilidade elétrica. A sua morfologia e tonalidades fazem dela um material esteticamente agradável e a sua aparência pode ser facilmente alterada através de revestimentos como vernizes e lacas, entre outros acabamentos, podendo também ser esculpida com facilidade. A madeira danificada é facilmente reparada e as estruturas de madeira são correntemente reforçadas, alteradas ou reutilizadas. Além de que, resiste à oxidação, água salgada e outros agentes corrosivos, possui um alto valor de recuperação, boa resistência ao choque, pode ser tratada com conservantes e retardantes de fogo e pode ser combinada com quase qualquer outro material para usos funcionais e estéticos (PARRACHA, 2018).

Os painéis de cimento-madeira são similares aos painéis aglomerados, tendo como diferenças o tipo de aglutinante (cimento) e o método de prensagem (à temperatura ambiente)

(IWAKIRI *et al.*, 2015). Esse produto tem uma larga aceitação na construção civil em países asiáticos e europeus (POMARICO, 2013).

3.3 Madeira *Erythrina poeppigiana*

Na Bahia, onde se encontra a maior área plantada do cultivo do cacau sob o dossel da Mata Atlântica, ela vem sendo cultivado sob a mata raleada (cacau-cabruca), e sob o sombreamento de outras espécies arbóreas introduzidas no sistema conhecido regionalmente como (*cacau-eritrina*). Nesse contexto a *Erythrina* foi inserida nessa região para realizar o sombreamento do cacau, porém ela é invasora, se espalhou rapidamente pelas remanescentes da mata atlântica (Müller, Almeida e Sena-Gomes, 2004). Como a *Erythrina* se encontra na região na mata atlântica, é vedado o seu corte, porém existe o Decreto n° 15.180, que foi publicado pelo Governo do Estado da Bahia, em 2014, que permite assim manejo dessas cabrucas.

O gênero *Erythrina* ocorre nas regiões tropicais e subtropicais do mundo e possui cerca de 120 espécies, das quais 70 estão na região Neotropical, sendo 50 espécies no México, América Central e Caribe e 20 espécies na América do Sul (VASCONCELOS *et al.*, 2003; SCHRIRE, 2005). O nome *Erythrina* vem do grego "*erythros*", que significa vermelho, em alusão à cor de suas flores (SCHRIRE, 2005), porém existem outras cores de flores. No Brasil, é citada a ocorrência de 13 espécies, são elas: *E. amazonica* Krukoff, *E. cristagalli* L., *E. dominguezii* Hassl., *E. falcata* Benth., *E. fusca* Lour., *E. mulungu* Mart., *E. poeppigiana* (Walp.) O. F. Cook, *E. similis* Krukoff, *E. speciosa* Andr., *E. ulei* Harms, *E. variegata* L., *E. velutina* Willd. e *E. verna* Vell (MARTINS, 2020).

As espécies de *Erythrina* possuem uma ampla diversidade morfológica, são arbustos ou árvores que apresentam algumas características que facilitam sua identificação, como folhas trifolioladas, estípelas glandulares na base dos folíolos, acúleos no caule, ramos e/ou folhas, inflorescência em pseudorracemos eretos ou pêndulos, flores em sua maioria com estandarte vermelho, rosa ou laranja, com exceção de algumas espécies que apresentam outras cores como amarelo esverdeado, branco ou pálido (NEILL, 1993; MARTINS, 2014). Além das características macromorfológicas como folhas, flores e frutos, que são usadas na identificação de plantas, existem as micromorfológicas como os grãos de pólen, que variam morfológicamente de uma espécie para outra (ERDTMAN, 1966). O grão de pólen é produzindo nas anteras, com morfologia variada e uma parede quimicamente estável que protege o gametófito masculino e reconhece o estigma compatível para germinação (SOLER *et al.*, 2002).

A espécie *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O. F. Cook pertence à família Fabaceae, subfamília Papilionoidea. Leguminosae é uma das fundamentais em número de espécies (JUDD *et al.*, 2009) ela é considerada a terceira maior família de angiospermas do mundo, sendo representada por 766 gêneros e cerca de 19.580 espécies, distribuídos em sete subfamílias. No Brasil, ocorrem cerca de 246 gêneros e 2.999 espécies (BFG, 2018). Em terras brasileiras está entre as principais famílias que compõem a flora dos diferentes ecossistemas (SOUZA *et al.*, 2005). A sua ocorrência está nos estados do Acre e Amazonas, na mata pluvial da terra firme, e foi naturalizado na região sul da Bahia, onde foi introduzida para poder fazer o sombreamento dos cacauzeiros. Ela é considerada uma madeira leve, de densidade de aproximadamente, 0,41g/cm³. Possui baixa resistência, e é sujeita ao apodrecimento rapidamente (LORENZI, 1998).

3.4 Cimento Portland

A produção do cimento deu início há 2.000 anos, e teve um grande desenvolvimento até os dias de hoje. A produção industrial começou em meados do século 19, primeiramente era utilizados fornos de eixos, que posteriormente foram substituídos por fornos rotativos, que hoje em dia é o equipamento padrão em todo o mundo (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento portland é um pó fino com as propriedades aglomerantes, ligantes e aglutinantes, ele endurece sob a ação da água em reações irreversíveis, isso significa que após o tempo de cura dele ser endurecido, se molhar ele novamente irá permanecer endurecido. E quando o cimento é misturado com a água, areia, pedra britada, cal e outros materiais, obtêm-se concretos e argamassas com características e propriedades físico-mecânicas que varia em função da qualidade e das proporções dos materiais que compõe essa mistura.

O cimento portland é composto por clínquer e de outras adições, sendo que o clínquer é o principal componente, e está presente em quase todo tipo de cimento portland. O clínquer em pó desenvolve uma reação química que em presença na água, no primeiro instante torna-se pastoso e posteriormente, endurece e com isso adquire resistência e durabilidade (ABCP, 2002). Existem no mercado diversos tipos de cimento portland, que são normalizados designados pela sigla e por sua classe de resistência. Essas siglas correspondem ao prefixo CP sendo acrescido dos algarismos romanos de I a V, conforme o tipo de cimento, e as suas classes são indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão garantida pelo fabricante, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Tipos de Cimento e a NBR que os especificam

Designações	Classes	Norma ABNT
Cimento Portland Comum	CP-I 25, CP-I 32, CP-I 40	NBR - 5732
Cimento Portland Comum (com adições)	CP-I 25-S 25, CP-I 32-S 32, CP-I 40-S 40	NBR - 5732
Cimento Portland composto (com escórias)	CP-II 25-E 25, CP-II 32-E 32 CP-II 40-E 40	NBR - 11578
Cimento Portland composto (com pozolanas)	CP-II 25-Z 25, CP-II 32-Z 32 CP-II 40-Z 40	NBR - 11578
Cimento Portland composto (com filler)	CP-II 25-F 25, CP-II 32-F 32 CP-II 40-F 40	NBR - 11578
Cimento Portland de alto forno	CP-III 25-25, CP-III 32-32 CP-III 40-40	NBR - 5735
Cimento Portland Pozolânico	CP-I V 25-S 25 CP-IV 32-S 32	NBR - 5736
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP-V- ARI	NBR - 5733

Fonte: Adaptado Lima *et al.*, (2013).

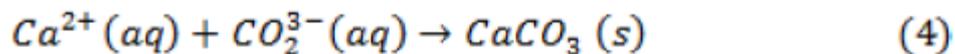
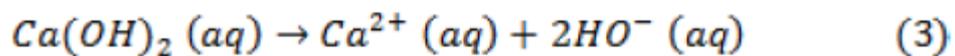
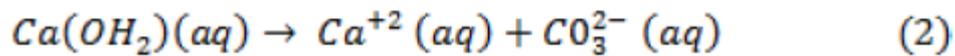
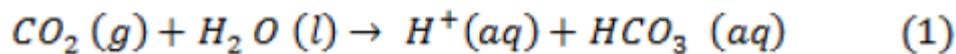
O CP V ARI tem a peculiaridade de atingir altas resistências ainda nos primeiros dias, devido à dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento e tem sido utilizado para a produção industrial de artefatos de concreto, concreto protendido, pisos industriais, argamassa armada e concreto dosado em central. Este cimento tem sido considerado o mais adequado para a produção de compósitos de cimento-madeira (ROCHA, 2017).

3.5 Processo de cura com a carbonatação acelerada

A carbonatação é uma etapa natural e lenta que ocorre ao longo dos anos na matriz cimentícia, por conta do CO₂ presente na atmosfera, onde a consequência deste processo é a queda do pH de valores por volta de 13 para um valor por volta de 8 nas zonas em que estão carbonatadas. Porém, essa etapa pode ter seu processo acelerado, através da exposição do compósito cimentício em ambiente controlado que contém uma elevada concentração de CO₂ (ALMEIDA *et al.*, 2013; AUROY *et al.*, 2018).

A carbonatação pode ser descrita pela difusão do CO₂ presente na atmosfera, através dos poros da matriz de cimento. O CO₂ é dissolvido na fase aquosa presente nos poros, transformado em ácido carbônico, que são dissociados em íons HCO₃⁻ e CO₃⁻, juntamente com a dissolução do hidróxido de cálcio, que libera íons Ca₂⁺ e OH⁻, que foram o carbonato de cálcio (PETER *et al.*, 2008).

Para os painéis cimento-madeira, o endurecimento satisfatório da matriz pode ser otimizado através do processo de cura com a carbonatação acelerada nas idades iniciais, segundo os autores Latorraca (2000) e Matoski (2005) os painéis cimento-madeira que são curados com carbonatação acelerada são endurecidos normalmente em torno de 05 minutos, já os painéis que não são curados com carbonatação acelerada, isso acontece, geralmente durante semanas. O CO_2 é dissolvido em água e é transformado em ácido carbônico (H_2CO_3) nos poros insaturados da matriz de cimento, ocorrendo à dissociação de íons HCO_3^- e CO_3^{2-} (Equação 1 e 2). Concomitantemente, a dissociação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em íons Ca^{2+} e OH^- aparece (Equação 3), que finalmente forma o CaCO_3 (Equação 4).



Para otimizar o processo, proporcionando maior e mais rápida carbonatação aos compósitos de fibrocimento, câmaras climáticas com aplicação de CO_2 podem ser utilizadas, reduzindo o tempo de formação do carbonato de cálcio e estabilidade do material cimentício (MARTINS *et al.*, 2018). Porém, é necessário adotar parâmetros adequados para atmosfera de cura, bem como, a utilização específica de CO_2 (CEFERINO *et al.*, 2017). É possível avaliar que a carbonatação acelerada realizada com concentração de 4% de CO_2 por 7 dias, é equivalente à carbonatação natural por 1 ano (HUSSAIN *et al.*, 2016).

Existem muitos parâmetros importantes envolvidos no processo de carbonatação, como temperatura, tempo de cura, umidade relativa, concentração de CO_2 e composição química da matriz cimentícia, todos eles interferem de alguma forma nas propriedades finais dos compósitos. A dinâmica ideal para a reação de carbonatação ocorre quando o CO_2 das moléculas, difundidas através do vazio do material, são capturadas pelas moléculas de água alocadas como um filme muito fino na parede dos poros. Quando esse fenômeno ocorre, há um espaço adequado no material para a formação do carbonato de cálcio (WANG *et al.*, 2017).

A carbonatação acelerada diminui o ataque nas fibras vegetais, devido a diminuição do pH, causando uma menor degradação das fibras. A redução do pH indica a ocorrência da carbonatação, uma vez que a reação de neutralização, ocasionada pela ação do dióxido de

carbono, resulta na transformação dos íons alcalinos, como os cátions de cálcio, em sais carbonatados (TONOLI *et al.*, 2010). Muitos autores investigaram o uso de carbonatação acelerada como cura para compósitos de fibrocimento (BALLESTEROS *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2013; TONOLI *et al.*, 2010; PIZZOL *et al.*, 2014). A alcalinidade da matriz de cimento é reduzida pelo processo de carbonatação, que proporciona melhores condições para as fibras vegetais (SANTOS *et al.*, 2015).

Toledo Filho *et al.* (2005) relataram um aumento significativo em termos de durabilidade em materiais compósitos de cimento com fibras de origem vegetal após 109 dias de exposição à atmosfera de dióxido de carbono.

Almeida *et al.* (2013), verificaram por meio da técnica de difração de raios X que as amostras que não passaram pelo processo de carbonatação apresentaram maiores intensidades nos picos relacionados à existência de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) e que as amostras carbonatadas tiveram maiores picos associados ao CaCO_3 (carbonatado de cálcio) e outros silicatos. Dessa forma, os autores explicaram a maior densificação das matrizes carbonatadas, já que o carbonato de cálcio é mais denso que o hidróxido de cálcio e, também, comprovaram a que a melhoria das propriedades mecânicas do material carbonatado está atrelada, a melhor interface entre fibra e matriz.

Um estudo realizado por Moon e Choi (2019) demonstrou que a pasta de cimento contendo pasta de escória apresentou melhoria na resistência após a cura da carbonatação. A pasta tinha uma resistência à compressão de 15,6 MPa antes da cura com CO_2 e 30,1 MPa após a cura, uma melhoria de 92,95%, sobre a cura sem CO_2 . Demonstrando, portanto, potencial da utilização da técnica de carbonatação na melhoria de propriedades mecânicas de compósitos.

Para os painéis cimento-madeira, o endurecimento satisfatório da matriz pode ser otimizado através do processo de cura com a carbonatação acelerada nas idades iniciais, possibilitando a reação do dióxido de carbono (CO_2) com os silicatos, principalmente o silicato dicálcico e o silicato tricálcico para a formação do CSH, que é a fase que atua como “binder” da pasta de cimento. A formação do CSH logo nas primeiras idades contribui para o aumento da resistência mecânica e na diminuição da porosidade (SHA; MORSHED, 2015; BORGES *et al.*, 2012).

Devido aos fatores mencionados anteriormente, a cura com a carbonatação acelerada se mostrou ser uma alternativa na melhoria da durabilidade dos compósitos, devido a modificação que é provocada na matriz cimentícia, reduzindo a alcalinidade, e com isso, torna-o menos agressivo para a madeira (ALMEIDA *et al.*, 2013). E ainda, é bom salientar

que de acordo com Cabral (2016), os painéis cimentícios que passaram pelo processo de cura através da carbonatação acelerada apresentaram maior módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), quando comparados àqueles curados em ambiente saturado, sem o processo de carbonatação acelerada.

3.6 Considerações sobre a revisão bibliográfica

As informações até aqui apresentadas contextualizam o estado da arte dessa pesquisa. A apresentação do potencial da utilização de uma madeira exótica considerada “ruim” como matéria prima para a produção dos painéis cimento-madeira.

Ficou evidente também na revisão bibliográfica que a cura com carbonatação acelerada se apresentou sendo uma técnica com potencial para minimizar os efeitos da alcalinidade do cimento portland nas partículas da madeira.

E considerando os aspectos negativos com relação a interação da madeira x cimento, os estudos sugeriram o uso de tratamentos para diminuir a absorção de água, como os teores de hemiceluloses e os extrativos, com isso ficou destacado a eficiência que o tratamento com água quente.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, L.K. et al. Cement-bonded composite boards with stalks. *Cement and Concrete Composites*, Kidlington v. 30, n.1, p 44-51, 2008.
- ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement and Concrete Composites*, Kidlington, v. 42, p. 49-58, 2013.
- AMZIANE, S.; SONEBI, M. Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, v. 1, p. 31-38, 2016.
- ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R.D. 2015. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research. *Construction and Building Materials* v. 79, p.115 – 128.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (Ed). *GUIA BÁSICO DE UTILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND: Boletim Técnico*. 7 ed. São Paulo, 2002, 28 p. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteúdo/wp-content/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf>. Acesso em 17 de jun de 2021.
- ALMEIDA, A. E. F. S., TONOLI, G. H. D., SANTOS, S. F., & SAVASTANO JR, H. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement and Concrete Composites*, v. 42, p. 49-58, 2013.
- ASANTE, B., SCHMIDT, G., TEIXEIRA, R., KRAUSE, A., & JUNIOR, H. S. (2021). Influence of wood pretreatment and fly ash particle size on the performance of geopolymer wood composite. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(3), 597–609. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01671-9>
- ATOYEBI, O, D.; AWOLUSI, T. F.; DAVIES, I, E,E, Artificial neural network evaluation of cement-bonded particle board produced from red iron wood (*Lophira alata*) sawdust and palm kernel shell residues. *Case Studies in Construction Materials*, v.9,p. e00185,2018.
- AUROY, M. et al. Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO₂): Impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking. *Cement and Concrete Research*, Kidlington, v. 109, p. 64-80, 2018.
- BALLESTEROS, J.E.M; MARMOL, G; FILOMENO, R.;RODIER, L; SAVASTANO JR. H.S;, Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance, *Constr. Build. Mater.* v. 2, p.52–60, 2019.
- BFG. The Brazil Flora Group. *Brazilian Flora 2020: Innovation and collaboration to meet Target 1 of the Global Strategy for Plant Conservation (GSPC)*. *Rodriguésia*, v.69, n.4, p.1513-1527, 2018. DOI : <http://doi.org/10.1590/2175-7860201869402>
- BILCATI, G. K. et al. Uso Potential de la fibra de curauá (*ananas acutifolius*) para la fabricación de compuestos cementicios. *Revista ingeniería de construcción*, Santiago, v.33, n.2,p. 155-160, 2018.
- BORGES, P. H. R. et al. Carbonation durability of blended cement pastes used for waste encapsulation. *Materials and Structures*. Dordrecht. v. 45, n. 5, p. 663-678,2011.
- CABRAL, M. R. Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar

curados por carbonatação acelerada. 2016. 81 f, Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016. Acesso em 25 de out 2022.

CASTRO, V. et al. Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. *Revista Árvore*, Viçosa-MG v. 38, n.5, p. 935-942, 2014.

CEFERRINO, G. E., REMPE, N., DOS SANTOS, V., & JUNIOR, H. S. Definition of optimal parameters for supercritical carbonation treatment of vegetable fiber-cement composites at a very early age. *Construction and Building Materials*, v.152, p. 424-433, 2017.

DIQUÉLOU, Y. et al. Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 112, p. 506-517, 2016.

ERDTMAN, G.. *Pollen morphology and plant taxonomy: Angiosperms*, New York: Hafner Publishing Company, 1966.

FAN, M., NDIKONTAR, M. K., ZHOU, X., & NGAMVENG, J. N. (2012). Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, 36, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.089>

FERRAZ, J. M. et al. Effects of treatment of coir fiber and cement/fiber ratio on properties of cement-bonded composites. *BioResources*. Raleigh, v.6, n.3. p. 3481-3492, 2011.

FRYBORT, S., MAURITZ, R., TEISCHINGER, A., & MÜLLER, U. (2008). Cement bonded composites - A mechanical review. *BioResources*, 3(2), 602–626. <https://doi.org/10.15376/biores.3.2.602-626>

GARCEZ, M. R., GARCEZ, E. O., MACHADO, A. O., & GATTO, D. A. (2016). Cement-Wood Composites: Effects of Wood Species, Particle Treatments and Mix Proportion. *International Journal of Composite Materials*, 6(1), 1–8. <https://doi.org/10.5923/j.cmaterials.20160601.01>

GARCI, M. J.C .; JENNINGS, H. M. New Insights into the Effects of Sugar on the Hydration and Microstructure of Cement Pastes. *Cement and Concrete Research*, Kidlington, v. 32, n. 3. p. 393-399, 2002.

HUSSAIN, Shaik; BHUNIA, Dipendu; SINGH, S. B. Assessment of carbonation depth under natural and accelerated carbonation conditions. *Indian Concr. J*, p. 57-64, 2016.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium Amazonicum* "paricá" e *Cecropia hololeuca* "embaúba" para produção de painéis cimento-madeira. *Cerne*, Lavras, v. 18, n.2, p. 303-308, 2012.

IWAKIRI, S. et al. Propriedades tecnológicas de painéis cimento-madeira produzidos com partículas de eucalipto. *Ciências Agroveterinárias*, Lages, v. 14, n. 3, p. 217-223, 2015.

JORGE, F. C; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites : a review. *Holz Als Roh-und Werkstoff*, Heidelberg, v. 62, n. 5, p. 370-377, 2004.

JUDD, W.S.; CAMPBELLI, C.S.; KELLOGG, E.A.; STEVENS, P. F.; DONOGHUE, M.J.. *Sistemática vegetal: um enfoque filogenético*. 3 ed. Porto Alegre; Artmed, 2009.

- LATORRACA, J. V., F. Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira. 2000, 191 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, 2000.
- LEBORGNE, M. R.; GUTKOWSKI, R. M. Effects of various admixtures and shear keys in wood-concrete composite beams. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v.24, n. 9, p. 1730-1738, 2010.
- LI, M., NICOLAS, V., KHELIFA, M., EL GANAOU, M., FIERRO, V., & CELZARD, A. (2019). Modelling the hygrothermal behaviour of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. *Industrial Crops and Products*, 142(July). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111784>
- LIMA, C., CAGGIANO, A., FAELLA, C., MARTINELLI, E., PEPE, M., & REALFONZO, R. (2013). Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. *Construction and Building Materials*, 47, 547–559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.051>
- LIPINSKI, E. Potential technologies for effectively bonding wood with inorganic binders. In.: *International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference*, 1994. Washington.
- LORENZI, Harri, 1949- *Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil/ Harri Lorenzi*. --2 ed. -- Nova Odessa, SP: Editora Plantarum, 1998.
- MARTINS, M.V.. Filogenia do gênero *Erythrina* L. (leguminosae, papilionoideae, phaseoleae) e revisão taxonômica das espécies ocorrentes no Brasil. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014).
- MARTINS, R. O. G., RITA DE CÁSSIA, S., PEDROTI, L. G., DE OLIVEIRA, A. F., MENDES, B. C., & DE AZEVEDO, A. R. G. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. *Construction and Building Materials*, v. 159, p. 261-268, 2018.
- MARTINS, M.V.. *Erythrina* in *Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020.
- MATOSKI, A. Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira, 2005. 187 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- MOON, E. J., & CHOI, Y. C. Carbon dioxide fixation via accelerated carbonation of cement-based materials: Potential for construction materials applications. *Construction and Building Materials*, Guildford , v. 199, p. 676-687, 2019.
- MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A.D. Effect of Various Treatments and Additives on Wood-Portland Cement-Water Systems. *Wood and Fiber Science*, Monona, v. 15, n.2, p. 164-176, 1983.
- MÜLLER, W. M.; ALMEIDA, M. C. V. de; SENAGOMES, A. R. 2004. Sistemas agroflorestais com cacau como exploração sustentável dos biomas tropicais. In *Sistemas agroflorestais, tendência da agricultura ecológica nos trópicos: Sustento da vida e sustento de vida*. pp. 160-180.

NA, B., WANG, Z., WANG, H., & LU, X. (2014). WOOD-cement compatibility review Wood-cement compatibility review. Wood Research, January.

NEILL, D.. The genus *Erythrina* : taxonomy, distribution and ecological differentiation . In: WESTLEY, S, B.; POWELL, M. H.. *Erythrina in the New and Old Worlds*. Nitrogen Fixing Tree Research Reports. 1993. p. 15-25.

ONUAGULUCHI, O., & BANTHIA, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>

PAGE, J. et al. Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 140, p. 344-353, 2017.

PARRACHA, J. L. (2018) Avaliação do impacto de caruncho pequeno em estruturas antigas de madeira, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, FCT NOVA.

PETER, M.A. et al. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. *Cement and Concrete Research*, Kidlington, v. 38, n, 12, p. 1385-1393, 2008.

PIZZOL, V. D., MENDES, L. M., FREZZATTI, L., SAVASTANO JR, H., & TONOLI, G. H. D. Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites. *Minerals Engineering*, v. 59, p.101-106, 2014.

POMARICO, F. A. Potencial de utilização da madeira de clones de eucalipto na produção de painéis cimento-madeira.2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

QUIROGA, A., MARZOCCHI, V., & RINTOUL, I. (2016). Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers. *Composites Part B: Engineering*, 84, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>

ROCHA, T. M. S. (2017). CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE PLACAS PARA VEDAÇÃO VERTICAL PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO, UTILIZANDO GESSO E CIMENTO COMO AGLOMERANTE. In *Ekp* (Vol. 13, Issue 3).

SANTOS, S. F., TONOLI, G. H. D., MEJIA, J. E. B., FIORELLI, J., & SAVASTANO JR, H.. Compuestos cementantes no convencionales reforzados con fibras vegetales: Una revisión de estrategias para mejorar la durabilidad. *Materiales de Construccion*, v. 65, p.1-20, 2015.

SCHRIRE, B. D.. *Tribo Phaseoleae*. In: LEWIS, G.; SCHIRIRE, B.D.; MACKINDER, B.; LOCK, M .. *Legumes of the world*. Kew: Royal Botanic Gardens, 2005. p. 393-431.

SCHNEIDER, M., ROMER, M., TSCHUDIN, M., & BOLIO, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>

SHAO, Y, MORSHED, A.Z. Early carbonation for hollow-core concrete slab curing carbon dioxide recycling. *Materials and Structures*. Dordrecht. v. 48, n. 1-2,p. 307-319,2015.

SILVA, G.C. et al. Efeito de aditivos minerais sobre as propriedades de chapas cimento-madeira. *Revista Árvore*, Viçosa, v.30, n.3, p. 451-456, 2006.

SOLER, J.B.; NOLLA J. M.R. Introducción. In: VALERO- SANTIAGO, A. L.; CADAHIA-GARCÍA, A.. Polinosis, Polen y Alergia. MRA, 2002. p.7-16.

SOUZA, V.C.; LORENZI, H.. Botânica sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de angiospermas da flora brasileira, baseado em APG II. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2005.

TEIXEIRA, D.E. 2012. Recycled old corrugated container fiber for wool-fiber cement sheets. ISRN Forestry, 2012: 8. Article ID923413

TEIXEIRA, J. N., SILVA, D. W., VILELA, A. P., SAVASTANO JUNIOR, H., DE SIQUEIRA BRANDÃO VAZ, L. E. V., & MENDES, R. F. (2020). Lignocellulosic Materials for Fiber Cement Production. Waste and Biomass Valorization, 11(5), 2193–2200. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0536-y>

TOLEDO FILHO, R. D., GHAVAMI, K., SANJUÁN, M. A., & ENGLAND, G. L. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. Cement and Concrete Composites, Barking, v. 27, n. 5, p. 537-546, May 2005.

TONOLI, G. H. D., SANTOS, S., JOAQUIM, A. P., & SAVASTANO JR, H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. Construction and Building materials, v. 2, p. 193-201, 2010.

VAN ELTEN, G. J. Production of wood wool cement board and wood strand cement board (Eltoboard) on one plant and applications of the products. In: INTERNATIONAL INORGANIC BONDED FIBER COMPOSITES CONFERENCE, 10., 2006, São Paulo. Abstracts... São Paulo, 2006. p. 1-12

VASCONCELOS, S. M. M.; OLIVEIRA, R.G.; CARVALHO, M.; RODRIGUES, A.C.P.; SILVEIRA, R. E.; FONTELES, F. M.; SOUSA, F.C.; VIANA, B.G,S.. Antinociceptive activities of the hydroalcoholic extracts from Erythrina velutina and Erythrina mulungu in mice. Biological Pharmaceutical Bulletin, v.26, n.7, p.946-949,2003, DOI: <http://doi.org/10.1248/bpb.26.946>

VILLAS-BÔAS, B. T., & IWAKIRI, S. (2017). Scientia Forestalis Efeito das dimensões de partículas de madeira e velocidade de vibração na resistência mecânica de compósitos cimento-madeira moldados com compactação vibro dinâmica Effect of wood particle size and vibrating speed on mechanical stren. Forestalis, [S.L.], v. 45, n. 116, p. 739-748, 1 Dez. 2017. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF)., 739–748.

WANG, T., HUANG, H., HU, X., FANG, M., LUO, Z., & GUO, R. Accelerated mineral carbonation curing of cement paste for CO₂ sequestration and enhanced properties of blended calcium silicate. Chemical Engineering Journal, v. 323, p. 320-329, 2017.

ZUCCO, L.L. Estudo da viabilidade da fabricação de placas de compostos á base de cimento e casa de arroz. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual Campinas. Campinas. 1999.

EFEITO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA NAS PROPRIEDADES DE PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA DA ESPÉCIE *Erythrina poeppigiana*

RESUMO

As partículas de madeira são uma alternativa ao reforço de painéis de madeira-cimento. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de *Erythrina spp.* madeira na produção de painéis de madeira-cimento com carbonatação acelerada. Painéis experimentais com densidade nominal de 1,25 g/cm³ foram produzidos utilizando cimento CPV-ARI como ligante mineral. As partículas de madeira foram tratadas com água quente. As propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos painéis foram investigadas. O tratamento com água quente diminuiu o teor de extrativos e melhorou a interação das partículas com o cimento, reduzindo a porosidade dos painéis madeira-cimento. A carbonatação acelerada proporcionou aos painéis melhores propriedades físicas e mecânicas, atendendo a todos os requisitos de qualidade da norma Bison. O tratamento T4 apresentou melhor MOR (14,80 MPa) e o T3 indica aumento significativo para o MOE em relação ao controle (2515,24 MPa para 4030,24 MPa). É tecnicamente viável utilizar a madeira de *Erythrina spp.* para produção de painéis madeira-cimento, valorizando a destinação das espécies florestais.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento com água quente; porosidade; resistência mecânica; espécies florestais.

EFFECT OF ACCELERATED CARBONATION ON THE PROPERTIES OF CEMENT-WOOD BOARDS OF THE SPECIES *Erythrina poeppigiana*

ABSTRACT

Wood particles are an alternative to the reinforcement of wood-cement panels. The aim of this study was to evaluate the use of *Erythrina spp.* wood in the production of wood-cement panels with accelerated carbonation. Experimental panels with a nominal density of 1.25 g/cm³ were produced using CPV-ARI cement as a mineral binder. Wood particles were treated with hot water. The physical, mechanical and microstructural properties of the panels were investigated. The treatment with hot water decreased the content of extractives and improved the interaction of the particles with the cement, reducing the porosity of the wood-cement panels. The accelerated carbonation provided the panels with better physical and mechanical properties, meeting all the quality requirements of the Bison standard. Treatment T4 showed better MOR (14.80 MPa) and T3 indicates a significant increase in MOE in relation to the control (2515.24 MPa to 4030.24 MPa). It is technically feasible to use the wood of *Erythrina spp.* for the production of wood-cement panels, valuing the destination of the forest species.

KEYWORDS: Hot water treatment; porosity; mechanical resistance; forest species.

1. INTRODUÇÃO

Os painéis de cimento de madeira são um dos produtos mais inovadores da indústria à base de madeira, e tem sido amplamente utilizados em aplicações de construção por aproximadamente 100 anos devido às suas propriedades excelentes, como baixo custo de produção, bom desempenho mecânico, baixa densidade, excelente durabilidade, bom isolamento acústico e térmico, alta estabilidade dimensional, dureza e alta resistência à água, fogo, fungos e ataque de insetos (QUIROGA, MARZOCCHI e RINTOUL, 2016; ÇAVDAR, YEL e TORUN, 2022). A crescente preocupação com os impactos ambientais em todo mundo causados pelos materiais baseados em combustíveis fósseis aumentou a popularidade e a importância de aplicação dos painéis de cimento madeira graças à sua natureza ecológica, qualidade desejável e versatilidade na aplicação (WEI, ZHOU e TOMITA, 2000; HASAN, HOVARTH e ALPAR, 2021). Os painéis de cimento madeira são feitos a partir de uma combinação de madeira, cimento, água e pequenas quantidades de aditivos químicos (RANA *et al.*, 2020; ASHORI, TABARSA e SEPAHVAND, 2012). A madeira é usada como material de reforço em diferentes formas e tamanhos, como fibras, partículas, flocos, fios ou lã de madeira (excelsior), dependendo do uso pretendido dos painéis (YEL, 2022). Uma das vantagens consideráveis do uso da madeira em painéis de cimento é que eles podem melhorar notavelmente a dureza e a resistência mecânica dos mesmos (RANA *et al.*, 2020; FERRAZ *et al.*, 2012; CAPRAI *et al.*, 2018; RANA *et al.* 2020).

Um dos principais desafios na fabricação de painéis de cimento madeira é a incompatibilidade do cimento com a madeira ou resíduos agroindustriais, interferindo na hidratação e cura do cimento e resultando em baixo desempenho mecânico dos painéis cimento madeira. Em um ambiente alcalino, os açúcares solúveis e os extrativos dos materiais lignocelulósicos podem inibir as reações de hidratação do cimento. Diferentes métodos de pré-tratamento, como água fria/quente e extrações de NaOH podem ser aplicados para minimizar o efeito inibidor de materiais lignocelulósicos na reação de hidratação do cimento. Além disso, a adição de produtos químicos eficazes pode ser usada para superar os problemas de inibição (RANA *et al.*, 2020; HASAN, HOVARTH e ALPAR, 2021; NASSER *et al.*, 2014).

A degradação do material lignocelulósico ao longo do tempo, devido à alcalinidade do cimento é outro problema atrelado à utilização dos painéis cimento madeira. A carbonatação é uma alternativa para solução deste problema, pois modifica a matriz cimentícia, reduzindo a alcalinidade, tornando o meio menos agressivo para o material lignocelulósico (ALMEIDA *et*

al., 2013). Para otimizar o processo, proporcionando maior e mais rápida carbonatação aos compósitos de cimento, câmaras climáticas com aplicação de CO₂ e com controle de temperatura e umidade relativa podem ser utilizadas, sendo este processo denominado de carbonatação acelerada. Além disso, a carbonatação acelerada pode diminuir a porosidade e a absorção de água e melhorar o desempenho mecânico dos painéis cimento madeira (TONOLI *et al.*, 2010).

Erythrina poeppigiana é uma espécie exótica de rápido crescimento que pertence à família Fabaceae, e foi plantada em grande quantidade em associação com o cacau na segunda metade do século XX no sul da Bahia, sendo o estoque de madeira desta espécie na região estimado em 1.000.000 de m³. A madeira de *Erythrina poeppigiana* não apresenta boa qualidade quando utilizada como madeira sólida, sendo a produção de lâminas e painéis de madeira uma alternativa para destinação final da mesma, uma vez que o estudo de novas espécies de rápido crescimento é de suma importância para diversificar a oferta de matéria prima e suprir a possível carência das indústrias de base florestal, que na sua maioria utilizam madeiras provenientes de cultivos florestais de pinus e eucalipto (SÁ *et al.*, 2012). Sendo assim, este estudo objetiva analisar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos painéis cimento madeira com e sem o processo de carbonatação acelerada, utilizando partículas de *Erythrina poeppigiana* com e sem o tratamento com água quente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Matéria-prima

A madeira *Erythrina poppegiana* foi proveniente de plantios experimentais da Universidade Federal do Sul da Bahia, das áreas de cabucas da cidade de Ilhéus - Bahia. Toras de 4 m de comprimento foram seccionadas em toretes de 58 cm de comprimento e posteriormente foram armazenadas em um tanque contendo água quente por 24 h para posterior laminação. Em seguida, lâminas de 2 mm de espessura foram obtidas em um torno laminador e foram processadas em um moinho martelo para geração de partículas do tipo *silver*. O material particulado foi peneirado, através de um conjunto de peneiras sobrepostas, cujas aberturas foram de 12 mesh (superior) e 40 mesh (inferior), respectivamente.

2.2. Tratamento com água quente

As partículas de madeira foram tratadas com água quente inicialmente a 100 °C por 6 h. Para a realização deste tratamento foi utilizada a relação de água:partículas de 15:1. Após o

tratamento com água quente as partículas foram lavadas em água corrente e secas em estufa a 60 °C durante 72 h, até atingir a umidade relativa de 8%.

2.3. Caracterização da madeira

A madeira foi caracterizada física e quimicamente conforme as análises e normas apresentadas na Tabela 1. As partículas foram analisadas quanto a composição química após o tratamento com água quente.

Tabela 1. Análises e normas realizadas para caracterização física e química de *Erythrina poeppigiana*

Análises	Normas
Densidade básica	NBR 11941 (ABNT, 2003)
Extrativos totais	NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina	NBR 7989 (ABNT, 2010)
Holocelulose (celulose + hemiceluloses)	Browning (1963)
Celulose	Kennedy, Phillips e Willians (1987)
Cinzas	NBR 13999 (ABNT, 2017)

O teor de hemicelulose foi quantificado pela diferença entre os teores de holoceluloses e celulose.

2.4. Produção dos painéis cimento madeira

Para produção dos painéis foi utilizado como aglomerante o cimento Portland CPV-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial). O aditivo químico utilizado foi o cloreto de cálcio (CaCl_2), para redução do tempo total de pega e endurecimento da mistura. Utilizaram-se partículas de madeira tratadas com água quente e não tratadas. Os materiais para produção dos painéis foram misturados em uma betoneira, seguindo a metodologia aplicada por Latorraca (1996) e Lopes (2004). As variáveis utilizadas para a produção dos painéis podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis para produção dos painéis cimento madeira

Parâmetros	Valores
Relação madeira:cimento	1:2,75
Relação água:cimento	1:2,5
Aditivo CaCl_2	4%
Densidade nominal do painel	1,25 g/cm ³

Após a mistura e homogeneização dos materiais em betoneira, a massa resultante da mistura para cada painel foi devidamente pesada, separada e distribuída aleatoriamente sobre chapas de alumínio untadas com óleo de baixa viscosidade para facilitar a retirada do painel após sua prensagem e grampeamento. Com o auxílio de aros de ferro com dimensões de 48 x 48 x 1,5 cm para controlar as dimensões e a espessura dos painéis.

Foi utilizado a prensa fria, carregada com três painéis e os aparatos para o grampeamento, para atingir uma pressão de 4 MPa. Os painéis permaneceram grampeados por 24 h, após a retirada dos grampos os painéis foram acondicionados em câmara de climatização com temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 3\%$, por um período de 28 dias.

2.5. Carbonatação Acelerada

Painéis produzidos com partículas tratadas com água quente e sem tratamento, foram destinados ao processo de carbonatação acelerada após 3 dias de cura. Corpos-de-prova, retirados em serra circular, foram colocados em uma autoclave vertical, dotada de um manômetro que controla a pressão interna da autoclave (Figura 1). A autoclave foi conectada a um cilindro de CO₂ também dotado de um manômetro no qual controla a saída do gás, sendo a conexão feita por uma mangueira de alta pressão. O CO₂ foi injetado de forma constante até o ponto em que o manômetro da autoclave atinge-se a pressão de 0,75 kgf/cm². Os corpos-de-prova permaneceram neste sistema por 10 h, com pressão constante de 0,75 kgf/cm², sendo posteriormente retirados e acondicionados em câmara de climatização por 28 dias.

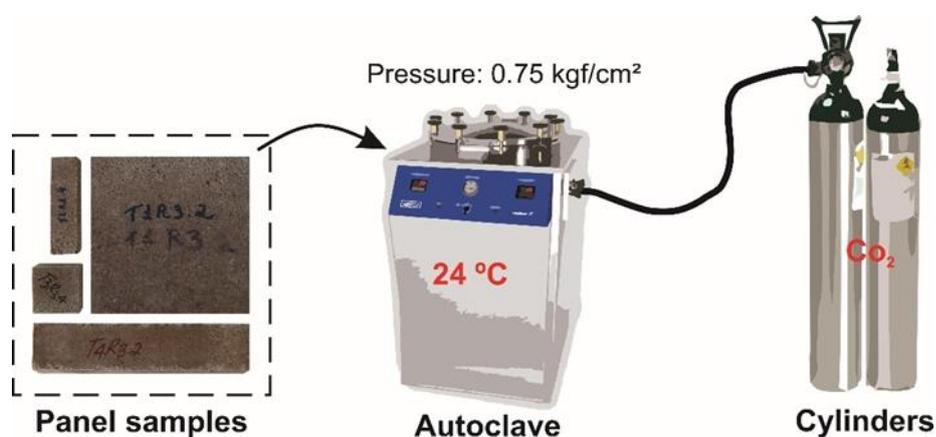


Figura 1. Processo de carbonatação acelerada de painéis cimento madeira

Na Tabela 3 encontra-se o plano experimental que foi utilizado neste estudo. O tratamento controle representa os painéis que não tiveram as partículas tratadas com água quente e não foram submetidos ao processo de carbonatação acelerada.

Tabela 3. Plano experimental

Tratamento	Parâmetros	Repetição
T1	Controle	3
T2	Água quente	
T3	Carbonatado	
T4	Água quente + carbonatado	

2.6. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas, os painéis foram ensaiados após atingirem 28 dias de cura. Na Tabela 4 estão descritos os testes e as normas utilizadas neste trabalho para a avaliação dos painéis.

Tabela 4. Ensaios e normas para determinação das propriedades físicas e mecânicas de painéis cimento madeira

Ensaios	Normas
Densidade aparente	D-1037 (ASTM, 2012)
Porosidade aparente	C 948-81 (ASTM, 2001)
Inchamento em espessura após 2 e 24 horas em imersão	D-1037 (ASTM, 2012)
Absorção de água após 2 e 24 horas em imersão	D-1037 (ASTM, 2012)
Compressão paralela à superfície do painel	D-1037 (ASTM, 2012)
Ligação interna	D-1037 (ASTM, 2012)
Flexão estática – Módulo de ruptura (MOR) e Módulo de elasticidade (MOE)	DIN-52362 (1982)

2.7. Análise microestrutural

Os painéis cimento madeira fraturados foram visualizados em microscópio óptico de luz composto Leica DM4000B (LM) acoplado com câmera digital Moticom X – Moticom Europe CMOS com aumento de 100x. Avaliou-se a região fraturada e a superfície dos painéis.

2.8. Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

As análises de espectroscopia infravermelha vibracional dos painéis foram realizadas em um espectrômetro Varian 600-IR Fourier Transform (FTIR) FT-IR, com o acessório

GladiATR da Pike Technologies acoplado para medições por refletância atenuada total (ATR) a 45° com um cristal de seleneto de zinco. A faixa espectral analisada foi de 450 a 4.000 cm⁻¹, resolução de 2 cm⁻¹ e 32 varreduras.

2.9. Análise por termogravimetria

A análise térmica dos painéis foi realizada com o analisador térmico TGA Q500 da TA Instruments (Delaware, EUA). Amostras de 10 mg dos painéis moídos foram adicionadas ao cadinho do equipamento e aquecidas de 25 a 800 °C. A condição de análise estabelecida foi em atmosfera de ar sintético (80% N₂ e 20% O₂) fluindo a 50 mL/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min (Raabe et al., 2015).

2.10. Análise dos resultados

Os tratamentos foram analisados obedecendo a um delineamento experimental inteiramente casualizado. Para verificar a influência do tratamento com água quente e da carbonatação acelerada nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, foi feita a comparação entre médias dos tratamentos estudados por meio do teste de Tukey a 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas por meio do programa estatístico SISVAR.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização da madeira

A densidade básica encontrada para *Erythrina poeppigiana* (Tabela 5) foi menor em relação aos encontrados na literatura para *Pinus spp.* e *Shizolobium amazonicum* (AMARAL et al., 1977; MENDES et al., 1999; SILVA et al., 2016; LOBÃO et al., 2012) que são madeiras comerciais utilizadas para produção de lâminas e painéis de madeira. Matos et al. (2019) encontram para madeiras de *Pinus oocarpa* e *Shizolobium amazonicum* uma densidade básica de 0,530 e 0,310 g/cm³, respectivamente. Segundo Iwakiri (2005) a densidade da madeira para produção de painéis cimento madeira deve ser de média a baixa para assegurar os níveis adequados para a densificação e consolidação do material.

Tabela 5. Valores médios de densidade básica e componentes químicos de *Erythrina poeppigiana*

Análises	Tratamento	
	Sem tratamento	Água quente

Extrativos Totais (%)	9.54a (\pm 1.36)	3.85b (\pm 0.73)
Lignina insolúvel (%)	18.92b (\pm 1.03)	24.61a (\pm 5.34)
Celulose (%)	43.01a (\pm 1.53)	41.69a (\pm 5.03)
Hemiceluloses (%)	25.40a (\pm 1.97)	28.80a (\pm 5.01)
Cinzas (%)	3.13a (\pm 0.07)	1.05b (\pm 0.04)
Densidade básica (g/cm ³)	0.262 (\pm 0.002)	

Médias seguidas de mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de tukey ($p > 0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

O tratamento com água quente proporcionou diferentes teores de extrativos totais, lignina e cinzas. O componente químico mais importante para o presente estudo é a quantificação do teor de extrativos, uma vez que a presença em grandes quantidades de extrativos pode afetar a cura do cimento e conseqüentemente afetar a interação entre a partícula de madeira e a matriz cimentícia (Iwakiri et al. 2012; Ferreira et al. 2012; Almeida et al. 2013). No estudo de Souza et al. (2021), observou-se elevada quantidade de extrativos nas fibras de coco (19,8%), sendo os principais responsáveis por dificultar e retardar o processo de cura do cimento, reduzindo a resistência mecânica dos painéis. Porém, o tratamento com água quente foi eficiente na redução do teor de extrativos totais, o que é desejável para a produção deste tipo de painel.

3.2 Propriedades físicas

Não foi verificado entre os tratamentos diferenças estatísticas para densidade aparente (Tabela 6). Os valores de densidade aparente apresentaram um baixo desvio padrão, o que demonstra homogeneidade da produção dentro de cada situação avaliada. Todos os tratamentos apresentaram densidade aparente abaixo da densidade nominal (1,25 g/cm³), em razão das perdas que ocorrem durante as etapas do processo de formação dos painéis e do retorno em espessura após a prensagem.

Tabela 6. Valores médios de densidade aparente e porosidade aparente de painéis cimento madeira com e sem carbonatação acelerada produzidos com partículas de *Erythrina poeppigiana* sem tratamento e tratadas com água quente.

Tratamento	Densidade aparente (g/cm ³)	Porosidade aparente (%)
T1	1,19a (\pm 0,78)	45.80a (\pm 7.49)
T2	1,11a (\pm 0,35)	38.28b (\pm 12.81)
T3	1,19a (\pm 0,26)	41.54ab (\pm 9.28)

T4

1,18a (± 0.33)28.91c (± 0.93)

Médias seguidas de mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de tukey ($p > 0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Segundo Scatolino *et al.* (2017), a baixa densidade da madeira é um dos fatores fundamentais para utilização de materiais lignocelulósicos na produção de painéis reconstituídos. Isso gera uma maior densificação podendo resultar em melhores propriedades mecânicas.

Verificou-se redução da porosidade aparente para os tratamentos T2 e T4 (Tabela 6). O tratamento com água quente aumentou a interação das partículas com o cimento reduzindo consequentemente a porosidade dos painéis (tratamentos T2 e T4). A carbonatação acelerada proporcionou menor porosidade aparente ao tratamento T4, quando comparado com os painéis avaliados nas diferentes condições (Figura 2). Em seus estudos Souroushian *et al.* (2012) e Tonoli *et al.* (2010) verificaram diminuição da porosidade em compósitos cimentícios carbonatados.

A Figura 2A mostra que a superfície do tratamento T1 é mais porosa em relação às demais condições avaliadas. Observam-se poros maiores para o tratamento T3 (Figura 2C). Por outro lado, as Figuras 2B e D mostram superfícies pouco porosas para os tratamentos T2 e T4.

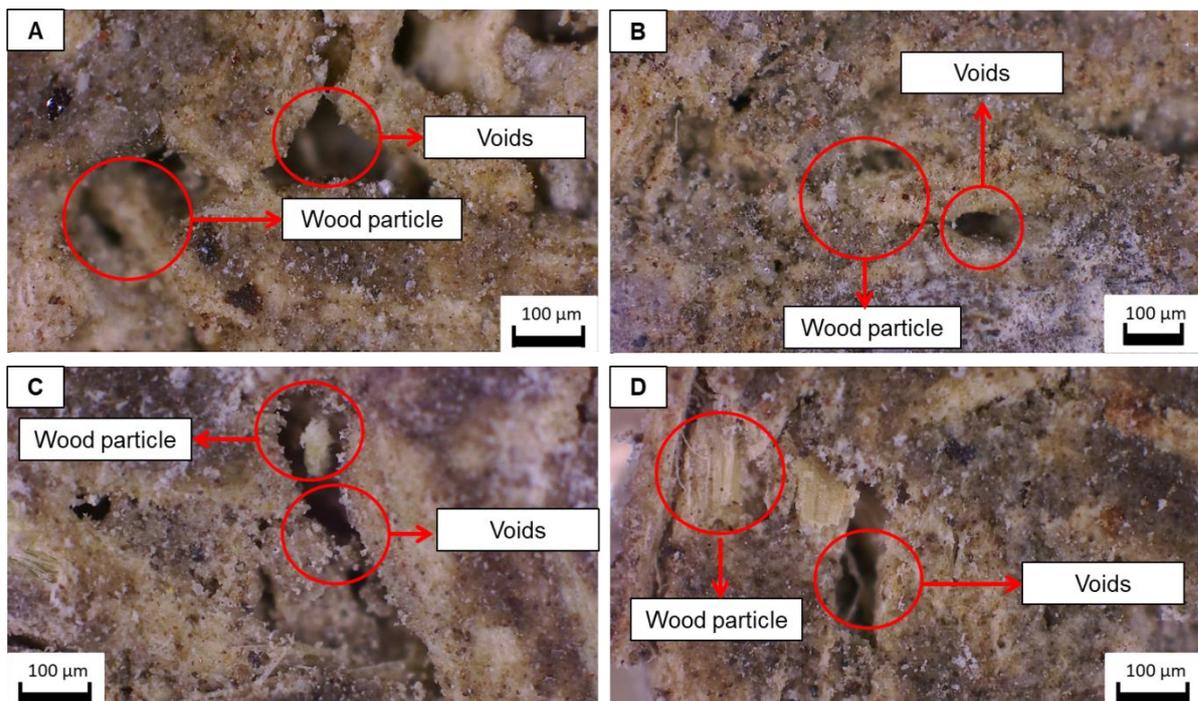


Figura 2. Imagens de microscopia de luz da superfície dos painéis cimento madeira: (A) controle (T1); (B) tratamento com água quente (T2); (C) carbonatado (T3) e (D) tratamento com água quente e carbonatado (T4).

Não foi verificada influência do tratamento com água quente nas propriedades de absorção de água em 2 h (AA2h) e 24 h (AA24h) para os painéis T2 (Tabela 7). Iwakiri *et al.* (2012) também não verificaram influência do tratamento com água quente por 6h na AA24h em painéis de cimento madeira de paricá. Iwakiri *et al.* (2015) não encontraram diferenças estatísticas nos valores de AA2h e AA24h para painéis cimento madeira de *Eucalyptus benthamii* produzidos com partículas não tratadas e tratadas com água quente por 6h.

Tabela 7. Valores médios de absorção de água e inchamento em espessura dos painéis cimento madeira

Tratamento	AA2h (%)	AA24h (%)	IE2h (%)	IE24h (%)
T1	11,95a ($\pm 1,42$)	18,50a ($\pm 4,07$)	1,55a ($\pm 0,78$)	2,83a ($\pm 1,71$)
T2	11,30a ($\pm 0,98$)	14,57a ($\pm 1,25$)	1,14a ($\pm 0,35$)	1,36a ($\pm 0,27$)
T3	4,98b ($\pm 1,28$)	8,89b ($\pm 2,40$)	0,51b ($\pm 0,26$)	0,68b ($\pm 0,30$)
T4	4,52b ($\pm 1,33$)	8,77b ($\pm 1,55$)	0,48b ($\pm 0,33$)	0,76b ($\pm 0,25$)

Médias seguidas de mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de tukey ($p > 0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Os painéis que sofreram carbonatação acelerada (tratamentos T3 e T4) apresentaram menores valores para as propriedades de AA2h e AA24h em relação aos tratamentos sem carbonatação (T1 e T2) (ver Tabela 7). A carbonatação acelerada potencializa a formação de carbonato de cálcio nos poros dos materiais cimentícios. A redução da absorção de água no tratamento T3 pode ser justificada pelo preenchimento dos poros dos painéis com carbonato de cálcio. Com relação ao tratamento T4, a diminuição da absorção de água pode ser explicada pela menor porosidade encontrada para esse painel (ver Tabela 6).

Para IE2h e IE24h também não foi verificado influência do tratamento com água quente (T2), pois os valores de IE2h e IE24h foram estatisticamente iguais ao do controle (T1) (Tabela 7). O inchamento em espessura dos painéis cimento madeira é influenciado pela quantidade de madeira e o seu recobrimento adequado pela matriz cimentícia (MENDES *et al.*, 2017). Devido ao fato da carbonatação acelerar a cura do cimento o recobrimento das partículas de madeira pela matriz cimentícia foi mais eficiente para os painéis submetidos à

carbonatação acelerada (T3 e T4), resultando nos menores valores de IE2h e IE24h após imersão em água.

De acordo com o processo Bison (2017), os painéis de cimento madeira devem apresentar valores de IE2h inferiores a 1,0% e para IE24h inferiores a 1,5%. Neste estudo apenas os painéis submetidos à carbonatação acelerada (tratamentos T3 e T4) atenderam ao recomendado pelo processo de Bison (2017) para IE2h. Já para IE24h apenas o controle (T1) não atingiu os valores recomendados pelo processo de Bison (2017).

3.3 Propriedades mecânicas

Os tratamentos T1 e T2 apresentaram valores de MOR e MOE semelhantes estatisticamente (Tabela 8). Os extrativos inibem a solidificação do cimento, influenciando negativamente as propriedades mecânicas dos painéis cimento madeira, o que não foi verificado neste estudo, uma vez que o tratamento com água quente reduziu os teores de extrativos totais (ver Tabela 5). Segundo Quiroga *et al.* (2016) a inibição da cura do cimento não depende apenas da quantidade de extrativos mas também do tipo.

Tabela 8. Propriedades mecânicas de painéis cimento madeira produzidos com partículas de *Erythrina poeppigiana*

Tratamento	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Compressão paralela (MPa)	Ligação interna (MPa)
T1	9,73b ($\pm 1,60$)	2515,24b ($\pm 726,33$)	0,63b ($\pm 0,16$)	0,60b ($\pm 0,26$)
T2	9,10b ($\pm 3,52$)	2332,19b ($\pm 782,30$)	0,83b ($\pm 0,27$)	0,66b ($\pm 0,29$)
T3	13,63a ($\pm 1,58$)	4030,24a ($\pm 513,06$)	1,92a ($\pm 0,32$)	0,95a ($\pm 0,17$)
T4	14,80a ($\pm 1,60$)	3569,48a ($\pm 619,27$)	1,60a ($\pm 0,30$)	1,04a ($\pm 0,35$)

Médias seguidas de mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de tukey ($p > 0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Os maiores valores de MOR e MOE foram encontrados para os tratamentos T3 e T4, sendo estes semelhantes estatisticamente (Tabela 8). Nas figuras 3C e D observa-se que os painéis carbonatados (tratamentos T3 e T4) não apresentaram partículas arrancadas e fraturadas, proporcionando uma matriz cimentícia densa e compacta que favorece a aderência das partículas e resulta em maior resistência mecânica. De acordo com Tonoli *et al.* (2010) a carbonatação causa a redução da alcalinidade na matriz, diminuindo a degradação do material lignocelulósico. Dessa forma, a resistência da partícula é preservada, devido a menor alcalinidade, melhorando o desempenho mecânico e ligação da partícula na matriz dos painéis

carbonatados. O processo de Bison (2017), determina o valor mínimo de 9,0 MPa para o MOR e de 3000 MPa para MOE. Desse modo, todos os tratamentos estudados atenderam a norma de comercialização para MOR, e para MOE apenas os tratamentos T3 e T4.

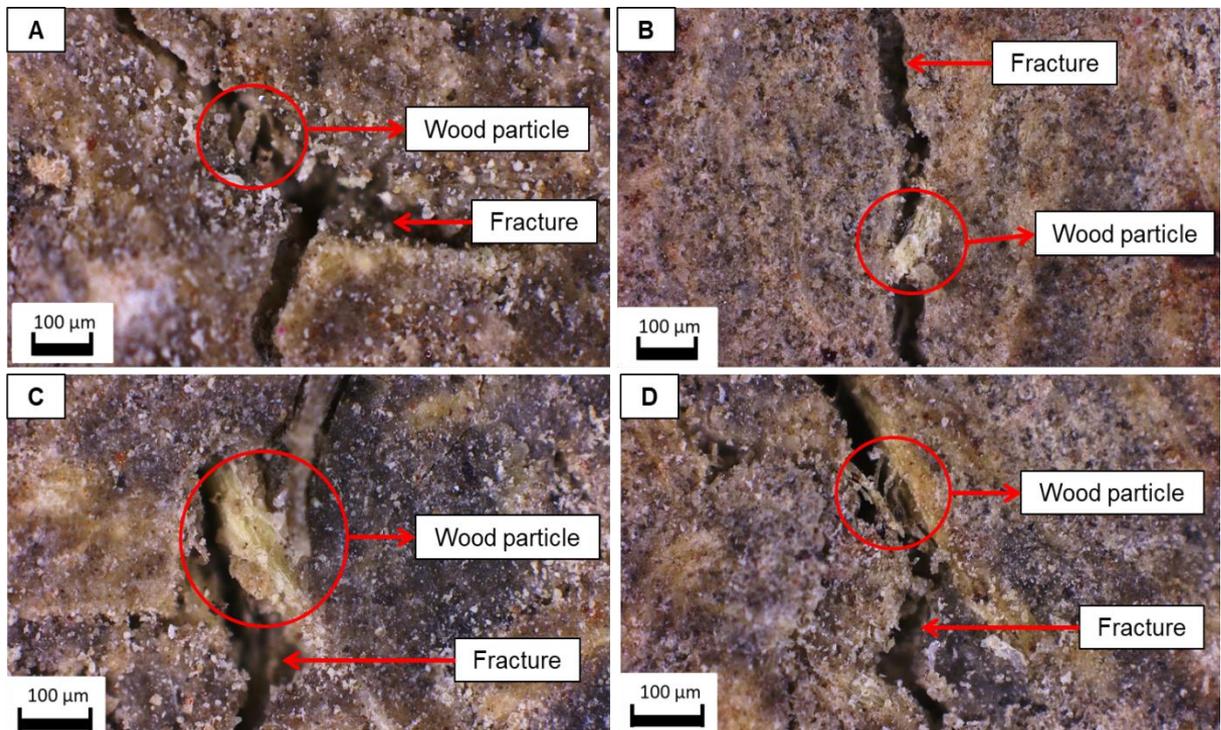


Figura 3. Imagens de microscopia de luz na fratura dos painéis cimento madeira: (A) controle (T1); (B) tratamento com água quente (T2); (C) carbonatado (T3) e (D) tratamento com água quente e carbonatado (T4).

Os painéis apresentaram na sua fratura os mecanismos de tenacificação associados às partículas, os quais atuam no processo de fratura do compósito, tais como desprendimento (*debond*), arrancamento (*pull-out*) e pontes (*bridging*), capazes de melhorar a capacidade do material em absorver energia e deformar permanentemente sem fraturar, através do escorregamento das partículas, ao invés do seu rompimento (Figura 3). As imagens revelaram painéis com partículas aderidas e ancoradas na matriz, com fissuras transversais, interrompidas pelas partículas de *Erythrina spp*, e recobertas pelos produtos da hidratação, que podem contribuir para o processo de petrificação das partículas. Os painéis apresentaram microfissuras que podem ser atribuídas aos cristais de hidróxido de cálcio de menor resistência, responsáveis pelo preenchimento dos espaços deixados pela água, e que apresentaram morfologia alterada pelas impurezas presente no sistema, características estas que podem se apresentar com intensidade diferenciada e que refletem no comportamento mecânico do compósito. Portanto, é possível visualizar nas imagens os produtos da hidratação

aderidos às partículas, os deslocamentos de algumas partículas na matriz e fissuras na zona de transição.

O tratamento T1 mostrou partículas fraturadas, arrancadas e desprendidas da matriz, indicando baixa aderência (Figura 3A). Os tratamentos T2 e T4 apresentaram partículas formando pontes e escorregamento na matriz, indicando que o tratamento com água quente ocasiona melhoria da interface (Figuras 3B e D), o que justifica a redução da porosidade nestes tratamentos (ver Tabela 6).

A carbonatação acelerada proporcionou maiores valores de compressão aos tratamentos T3 e T4 em relação aos tratamentos T1 e T2 (Tabela 8). A carbonatação acelerada melhora a durabilidade dos compósitos cimentícios, diminuindo a porosidade e deixando os mesmos menos susceptíveis a trincas e fissuras, resultando em maior resistência a compressão.

Encontraram-se maiores valores de ligação interna para os tratamentos T3 e T4 em relação aos tratamentos T1 e T2 (Tabela 8), demonstrando que houve um melhor recobrimento das partículas na matriz cimentícia dos painéis carbonatados. O processo Bison (2017), determina o valor mínimo de ligação interna de 0,40 MPa, sendo assim todos os tratamentos atenderam a norma de comercialização quanto a propriedade de ligação interna.

3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As bandas de 940 e 1415 cm^{-1} (Figura 4), são picos típicos de carbonato de cálcio (REIG *et al.* 2002; SANTOS *et al.* 2021). Verifica-se uma maior intensidade dos picos para o tratamento T1, indicando uma maior quantidade de carbonato de cálcio, e uma menor intensidade para o tratamento T2. Com relação aos painéis carbonatados, o tratamento T3 apresentou maiores intensidades das bandas de 940 e 1415 cm^{-1} em relação ao tratamento T4.

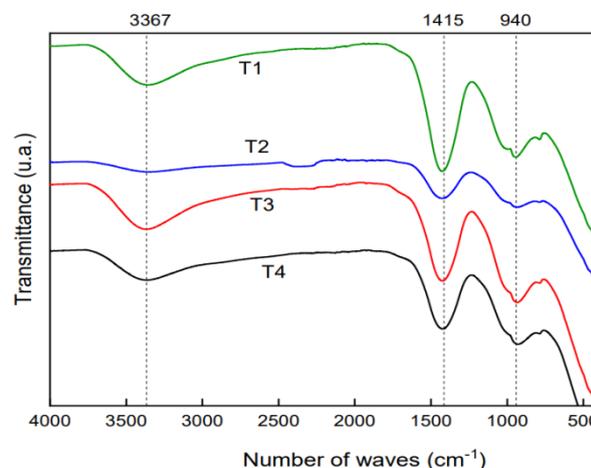


Figura 4. Espectros de FTIR de painéis cimento madeira produzidos com partículas de *Erythrina spp.*

As reações da carbonatação em compósitos cimentícios podem ser divididas em três etapas: Primeiro ocorre à difusão de CO_2 na matriz, em seguida, o CO_2 é dissolvido nos poros e os íons Ca^{2+} são migrados das partículas de cimento. O terceiro passo é a formação de carbonato de cálcio (TEIR, ELONEVA e ZEVENHOVEN, 2005; WANG *et al.*, 2019). A carbonatação acelerada promove uma maior formação de carbonato de cálcio, porém isto não ocorreu no presente estudo, devido a maior intensidade dos picos nas bandas de 940 e 1415 cm^{-1} para o tratamento controle (T1).

3.5 Termogravimetria

A Figura 5 descreve a termogravimetria (TG) e a perda de peso diferencial (DTG) dos painéis nas diferentes condições avaliadas. Eventos endotérmicos podem ser identificados nas zonas de temperatura de 100–250 °C (fases hidratadas de C-S-H) (MORANDEAU *et al.*, 2014), 300–400 e 450–550 °C ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ e carbonato de cálcio), e 700–800 °C (carbonatos estáveis e menos estáveis) (Figura 5B).

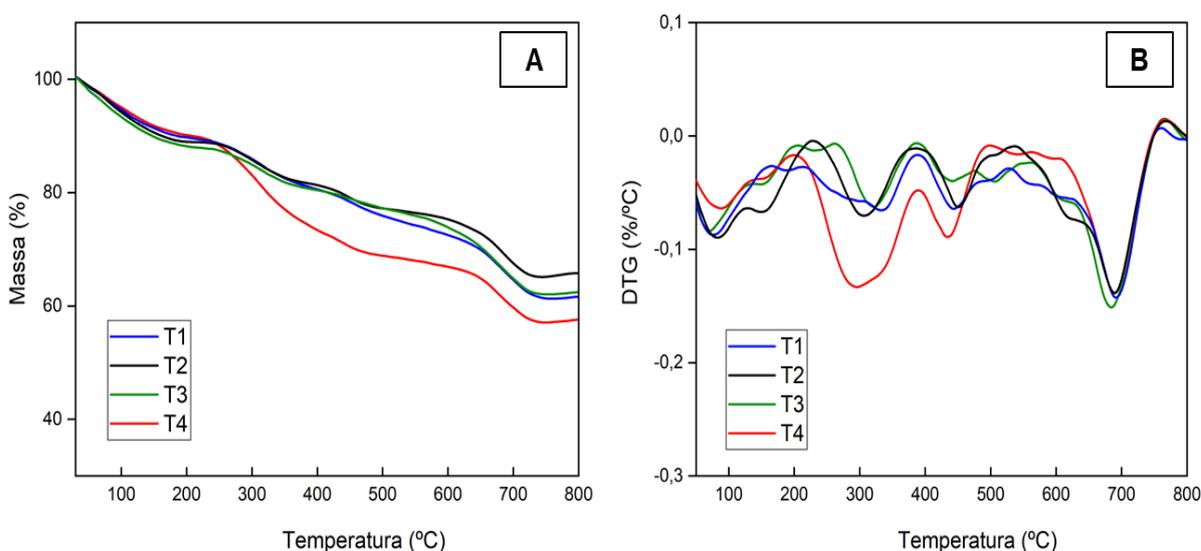


Figura 5. Curvas de degradação térmica de painéis cimento madeira de *Erythrina spp.*: (A) Termogravimetria (TG); (B) derivada (DTG).

A perda de massa entre 250–350 °C corresponde a degradação da celulose da madeira (Protásio *et al.*, 2015), já entre 400–450 °C ocorre a degradação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e carbonato de cálcio e na faixa de 550–700 °C apenas de carbonato de cálcio (CHOI *et al.*, 2017) (Figura 5B). Dentre as condições avaliadas, os tratamentos T1, T2 e T3 apresentam curvas de degradação térmicas na faixa de 50–600 °C semelhantes (Figura 4A), porém entre 600–800 °C (faixa de degradação do carbonato de cálcio) a perda de massa do tratamento T2 é menor,

devido a menor quantidade de carbonato de cálcio deste tratamento (ver Figura 4). O tratamento T4 apresenta a menor estabilidade térmica dentre as condições avaliadas, apresentando maior perda de massa na faixa de 300–800 °C (Figura 5A).

4. CONCLUSÕES

O tratamento com água quente diminuiu o teor de extrativos e melhorou a interação das partículas de *Erythrina spp.* com o cimento, reduzindo a porosidade, inchamento em espessura e absorção de água dos painéis cimento madeira. O tratamento T3 e T4 apresentaram redução, quando comparadas ao controle, quanto a essas propriedades mencionadas.

A carbonatação acelerada proporcionou aos painéis cimento madeira de *Erythrina spp.* melhores propriedades físicas e mecânicas, sendo atendidos todos os requisitos de qualidade da norma de Bison. O tratamento T4 apresentou melhor MOR (14,80 MPa) e o T3 indica aumento significativo para o MOE em relação ao controle (2515,24 MPa para 4030,24 MPa).

É viável tecnicamente a utilização da madeira de *Erythrina spp.* para produção de painéis cimento-madeira, fato que pode permitir agregação de valor e destinação adequada para esta espécie.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. E. F. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO J. R. H. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p. 49-58, 2013.
- AMARAL, A. C.; FERREIRA, M.; COUTO, H. T. Z. Métodos de avaliação da densidade básica da madeira de populações de pinheiros tropicais. **IPEF**, v. 15, p.47-67, 1977.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. **C 948-81**. Materials Philladelphia, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles. **D-1037**. Materials Philladelphia, 2012.
- ASHORI, A.; TABARSA, T.; SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite panels made from poplar strands. **Construct. Build. Mater.**, n. 26, p. 131-134, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – ABNT. Madeira – Determinação da densidade básica. **NBR 11941**, Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – ABNT. Madeira – Determinação do material solúvel em etanol-tolueno, em diclorometano e em acetona. **NBR 14853**, Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – ABNT. Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinzas) após a incineração a 525 °C. **NBR 13999**, Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – ABNT. Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. **NBR 7989**, Rio de Janeiro, 2010.
- BISON WOOD-CEMENT BOARD. Technical hand book. **Bison Report**. Berlin, p. 1- 36. 2017.
- BROWNING BL (1963). The chemistry of wood. New York: J. Wiley, 689 p.
- CAPRAI, V.; GAUVIN, F.; SCHOLLBACH, K.; BROUWERS, H. J. H. Influence of the spruce strands hygroscopic behaviour on the performances of wood-cement composites. **Construct. Build. Mater.**, n. 166, p. 522–530, 2018.
- ÇAVDAR, A. D.; YEL, H.; TORUN, S. B. Microcrystalline cellulose addition effects on the properties of wood cement boards. **J. Build. Eng.**, n. 48, 103975, 2022.
- CHOI, S. G.; PARK, S. S.; WU, S.; CHU, J. Methods for calcium carbonate content measurement of biocemented soils. **J. Mater. Civ. Eng.**, n. 29, ed. 11, 2017.
- FERRAZ, J. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R.; OKINO, E. Y. A.; MARTINS, S. A. Compatibility of pretreated coir fibres (*Cocos nucifera* L.) with Portland cement to produce mineral composites. **Int. J. Polym. Sci.**, 290571, 2012.
- FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with Portland cement matrices. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 1024-1034, 2012.

FILOMENO, R. H.; RODIER, L. B.; BALLESTEROS, J. E. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SAVASTANO J. R., H. Optimizing the modified atmosphere parameters in the carbonation process for improved fiber-cement performance. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 2020.

HASAN, K. M. F.; HORVATH, P. G.; ALPAR, T. Development of lignocellulosic fiber reinforced cement composite panels using semi-dry technology. **Cellulose**, n. 28, p. 3631-3645, 2021.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. FUPEF, Curitiba, 2005. 247 p.

IWAKIRI, S.; SILVA, L. S.; TRIANOSKI, R.; BONDUELLE, G. M.; ROCHA, V. Y. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, n. 18, ed. 2, 2012.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; CUNHA, A. B.; PRATA, J. G.; HARA, M.; BILA, N. F.; LUIS, R. C. G.; ARAÚJO, R. D. Propriedades tecnológicas de painéis cimento madeira produzidos com partículas de eucalipto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 14, n. 3, p. 217-223, 2015.

Kennedy, F.; Phillips, G. O.; Williams, E. P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellishor wood. **Chichester: E. Horwood**, 1130 p. 1987.

LATORRACA, J. V. F. **Estudo da viabilidade do uso da espécie *Eucalyptus dunnii* na manufatura de painéis de madeira-cimento**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996. 94 p.

LOBÃO, M. S.; COSTA, D. P.; ALMONACID, M. A. A.; TOMAZELLO FILHO, M. Qualidade do lenho de árvores de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* Acre, Brasil. **Floresta e ambiente**, v. 19, n. 3, p. 374-384, 2012.

LOPES, Y. L. V. **Utilização da madeira e cascas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004. 60 p.

MATOS, A. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; BORGES, C. C.; MATOS, L. C.; FERREIRA, J. C.; MENDES, L. M. Influência de diferentes composições de lâminas de *Shizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby e *Pinus oocarpa* var. *oocarpa* (Schiede ex Schltdl) para produção de compensados multilaminados. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 124, p. 799-810, 2019.

MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Variação da densidade da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. no sentido longitudinal dos caules. **Cerne**, v. 5, n. 11, p.102-111, 1999.

MENDES, R. F.; VILELA, A. P.; FARRAPO, C. L.; MENDES, J. F.; D. TONOLI, G. H.; MENDES, L. M. Lignocellulosic residues in cement-bonded panels. **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**, 1ed., v. 1, p. 3-16. 2017.

MORANDEAU, A.; THIERY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cem. Concr. Res.**, n. 56, p. 153–170, 2014.

NASSER, R. A.; AL-MEFARREJ, H. A.; ABDEL-AAL, M. A.; ALSHAHRANI, T. S. Effects of tree species and wood particle size on the properties of cement-bonded particleboard manufacturing from tree prunings. **J. Environ. Biol.**, n. 35, p. 961–971, 2014.

NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ. **DIN 52362**. Testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin, p. 39- 40. 1982.

PROTASIO, T. P.; MENDES, R. F.; SCATOLINO, M. V.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Thermal stability of particleboards of sugar cane bagasse and *Pinus* spp. wood. **Scientia Forestalis**, n. 43, p. 683–691, 2015.

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers. **Compos. B Eng.**, n. 84, p. 25-32, 2016.

RAABE, J.; FONSECA, A. S.; BUFALINO, L.; RIBEIRO, C.; MARTINS, M. A.; MARCONCINI, J. M.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D. Biocomposite of cassava starch reinforced with cellulose pulp fibers modified with deposition of silica (SiO₂) nanoparticles. **Journal of Nanomaterials**, v. 2015, p. 493-439, 2015.

RANA, M. N.; ISLAM, M. N.; NATH, S. K.; DAS, A. K.; ASHADUZZAMAN, M.; SHAMS, M. I. Influence of chemical additive on the physical and mechanical properties of cement - bonded composite panels made from jute stick. **J. Build. Eng.**, n. 31, 101358, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101358>.

REIG, F. B.; ADELANTADO, J. V. G.; MORENO, M. C. M. M. FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and sílica (quartz) mixtures using the constant ratio method. **Application to geological samples**, n. 58, p. 811-821, 2002.

SÁ, V. A.; BUFALINO, L.; ALBINO, V. C. S.; CORRÊA, A. A.; MENDES, L. M. Mistura de três espécies de reflorestamento na produção de painéis cimento-madeira. **Revista Árvore**, n. 36, ed. 3, 2012.

SANTOS, V. H. J. M.; PONTIN, D.; PONZI, G. G. D.; STEPANHA, A. S. G.; MARTEL, R. B.; SCHUTZ, M. K.; EINLOFT, S. M. O.; VECCHIA, F. D. Application of Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) coupled with multivariate regression for calcium carbonate (CaCO₃) quantification in cement. **Construction and Building Materials**, 313:125413, 2021.

SCATOLINO, M. V.; COSTA, A. O.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: physical and mechanical properties. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 139-146, 2017.

SILVA, M. G.; MORI, F. A.; FERREIRA, G. C.; RIBEIRO, A. O.; CARVALHO, A. G.; BARBOSA, A. C. M. C. Estudo anatômico e físico da madeira de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* proveniente de povoamentos nativos da Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p.293-301, 2016.

SOROUSHIAN, P.; WON, J. P.; HASSAN, M. Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Constr. Build. Mater.**, n. 34, p. 44–53, 2012.

SOUZA MJC, MELO RR, GUIMARÃES JUNIOR JB, CARNAVAL TKBDA, PIMENTA AS, MASCARENHAS ARP (2021) Wood–cement boards with addition of coconut husk. **Wood Material Science & Engineering** 17:1-10. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1914722>.

TEIR, S.; ELONEVA, S.; ZEVENHOVEN, R. Production of precipitated calcium carbonate from calcium silicates and carbon dioxide. **Energy Conversion and Management**, v. 46 (18-19), p. 2954-2979, 2005.

TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO, H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Constr. Build. Mater.**, n. 24, p. 193–201, 2010.

WANG, J.; XU, H.; XU, D.; DU, P.; ZHOU, Z.; YUAN, L.; CHENG, X. Accelerated carbonation of hardened cement pastes: Influence of porosity. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 159–169, 2019.

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite. The effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood cement composites. **J. Wood Sci.**, n. 46, p. 444-451, 2000.

YEL, H. Effect of alkaline pre-treatment and chemical additives on the performance of Wood cement panels manufactured from sunflower stems. **Journal of Building Engineering**, n. 52, 104465, 2022.