



ELIZIANE DENIZE DE CASTRO PENHA

**EFEITO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PAINÉIS
DE CIMENTO-MADEIRA PRODUZIDOS COM REJEITO DE
MINÉRIO DE FERRO**

**LAVRAS - MG
2025**

ELIZIANE DENIZE DE CASTRO PENHA

**EFEITO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PAINÉIS DE CIMENTO-
MADEIRA PRODUZIDOS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

Tese 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 Doutor.

Orientador

Prof. DSc. Lourival Marin Mendes

**LAVRAS – MG
2025**

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

Castro, Eliziane.

Efeito da carbonatação acelerada em painéis de cimento-madeira produzidos com
rejeito de minério de ferro / Eliziane Castro. - 2024.

87 p. : il.

Orientador: Lourival Marin Mendes

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.
Bibliografia.

1. Resíduo de mineração. 2. Partículas Lignocelulósicas. 3. Compósitos. I. Marin
Mendes, Lourival. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

ELIZIANE DENIZE DE CASTRO PENHA

**EFEITO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PAINÉIS DE CIMENTO-
MADEIRA PRODUZIDOS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

**EFFECT OF ACCELERATED CARBONATION ON CEMENT-WOOD PANELS
PRODUCED WITH IRON ORE TAILINGS**

Tese 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 Doutor.

APROVADA em 05 de fevereiro de 2024

DSc. Lourival Marin Mendes UFLA

DSc. Lina Bufalino UFRA

DSc. Andrea Aparecida Ribeiro Correa UFLA

DSc. José Benedito Guimarães Junior UFLA

DSc. Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira UFC

Orientador

Prof. DSc. Lourival Marin Mendes

**LAVRAS – MG
2025**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar forças para vencer mais este desafio.

Ao meu marido, Cláudio, por mais uma vez estar ao meu lado, sempre oferecendo seu amor, apoio e companheirismo.

À minha filha, Mariana, que mesmo tão pequena e sem nada entender, com apenas um sorriso renova minhas forças e me faz querer buscar sempre o meu melhor.

Aos meus pais e irmãs, em especial à minha irmã Eliane, cuja ajuda foi essencial para que eu conseguisse finalizar este trabalho. Compartilho com vocês mais esta vitória.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pela oportunidade concedida de cursar o Doutorado.

Ao meu orientador, Dr. Lourival Marin Mendes, pela orientação e incentivo dados no desenvolvimento deste trabalho, sempre se mostrando solícito e empático diante das minhas dificuldades.

Aos funcionários, técnicos, alunos e professores do Complexo BIOMAT, em especial ao professor José Benedito, Lorrán, Carlos e Bárbara, pela partilha de conhecimentos, ajuda e amizade.

Aos amigos da DPF-PROPLAG e PROINFRA, pela amizade, incentivo e apoio.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram e sempre torceram para que tudo desse certo, a minha eterna gratidão!

*“Consagre ao senhor tudo que você faz, e seus planos
serão bem-sucedidos” (Provérbios 16:3)*

RESUMO

O alto volume de resíduos gerados pelo beneficiamento do minério de ferro representa um grande desafio ambiental. O rompimento das barragens de Mariana-MG e Brumadinho-MG, evidenciou os riscos envolvidos nesse modelo de armazenamento de rejeito. Este estudo avaliou o desempenho físico, mecânico e térmico de painéis de cimento-madeira produzidos com partículas de *Pinus oocarpa*, cimento Portland CPV-ARI, cloreto de cálcio como aditivo e variadas proporções de RMF, em substituição ao cimento (0%, 10%, 20% e 30% em massa). O efeito da cura por carbonatação acelerada (CA) foi investigado, expondo todos os tratamentos a uma atmosfera concentrada de CO₂, sob pressão de 1,5 kgf/cm² e temperatura ambiente, por um período de 24 horas. As partículas de pinus foram caracterizadas quanto à composição química e morfológica. A atividade pozolânica do RMF foi avaliada conforme a NBR 15895 e a NBR 5752. Os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram comparados com especificações do processo BISON. A composição química dos painéis foi determinada por termogravimetria e espectroscopia de raio X por análise dispersiva (EDS). Os resultados demonstraram que a substituição parcial do cimento por RMF e a utilização de cura por CA tiveram efeito significativo na maioria das propriedades estudadas ($p < 0,05$). Para os painéis carbonatados foi possível observar uma redução no inchamento ($\sim -15\%$) e absorção de água ($\sim -10\%$), além de uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas ($\sim +40\%$). A interação entre o teor de rejeito de minério e a CA foi significativa apenas para as propriedades mecânicas ($p < 0,05$). Os dados indicam uma tendência de aumento na resistência com a aplicação de CA, efeito mais evidente para os painéis confeccionados com maiores porcentagens de RMF. Todos os tratamentos atenderam às determinações de comercialização para a propriedade de inchamento em espessura em 2 h e 24 h, bem como atingiram valores satisfatórios para o módulo de elasticidade (MOE) após cura por CA. Para o módulo de ruptura (MOR), apenas o tratamento com 30% de resíduo submetido a CA atingiu valor superior a 9 MPa, exigência mínima definida por BISON. Os resultados sugerem a viabilidade de utilizar o RMF em combinação com o cimento para a produção de painéis de cimento-madeira. Em larga escala, o aproveitamento do RMF na construção civil promove uma destinação mais segura para o material, agrega valor e reduz os custos de produção.

Palavras chaves: resíduo de mineração; partículas lignocelulósicas; compósitos.

ABSTRACT

The high volume of waste generated by iron ore processing represents a major environmental challenge. The collapse of the tailings dams in Mariana-MG and Brumadinho-MG highlighted the risks involved in this waste storage model. This study evaluated the physical, mechanical, and thermal performance of wood-cement panels produced with *Pinus oocarpa* particles, Portland cement CPV-ARI, calcium chloride as an additive, and varying proportions of iron ore tailings (IOT) as a partial replacement for cement (0%, 10%, 20%, and 30% by weight). The effect of accelerated carbonation curing (AC) was investigated by exposing all treatments to a concentrated CO₂ atmosphere at a pressure of 1.5 kgf/cm² and room temperature for 24 hours. The pine particles were characterized by their chemical composition and morphology. The pozzolanic activity of the IOT was assessed according to standards NBR 15895 and NBR 5752. The results of the physical and mechanical properties of the panels were compared with BISON process specifications. The chemical composition of the panels was determined through thermogravimetric analysis and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The results demonstrated that the partial replacement of cement by IOT and the use of AC had a significant effect on most of the studied properties ($p < 0.05$). For the carbonated panels, a reduction in thickness swelling (−15%) and water absorption (−10%) was observed, along with a significant improvement in mechanical properties (∼+40%). The interaction between IOT content and ACC was significant only for the mechanical properties ($p < 0.05$). The data indicates a trend of increased strength with the application of AC, a more pronounced effect in panels with higher IOT content. All treatments met the commercial requirements for thickness swelling after 2 h and 24 h, and achieved satisfactory values for the modulus of elasticity (MOE) after AC. For the modulus of rupture (MOR), only the treatment with 30% IOT subjected to AC reached a value above 9 MPa, the minimum requirement defined by BISON. The results suggest the feasibility of using IOT in combination with cement to produce wood-cement panels. On a large scale, the use of IOT in civil construction promotes safer waste disposal, adds value, and reduces production costs.

Keywords: mining residue; lignocellulosic particles; composites.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente estudo apresenta uma proposta inovadora baseada no aproveitamento do rejeito de minério de ferro para a fabricação de painéis de cimento-madeira destinados à construção civil. Foram avaliados aspectos fundamentais para a caracterização do material confeccionado, garantindo sua conformidade com os requisitos normativos, além da implementação e análise de diferentes formas de cura do compósito. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da utilização do rejeito de minério neste tipo de painel, com alguns tratamentos atingindo os critérios mínimos normativos, destacando-se aqueles que passaram pelo processo de cura por carbonatação acelerada. A pesquisa realizada está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, principalmente em relação aos objetivos 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao oferecer uma alternativa sustentável para o manejo do rejeito de minério, que vai além da armazenagem em barragens — método predominante no Brasil para o acondicionamento desse tipo de material — e que está frequentemente associado a desastres ambientais de grandes proporções, dentre os quais se destacam os registrados no Brasil nos últimos anos. Além disso, o emprego de resíduos industriais, que normalmente seriam descartados, possibilita a agregação de valor ao material, representando uma contribuição positiva em termos econômicos e socioambientais.

IMPACT INDICATORS

The present study introduces an innovative proposal based on the utilization of iron ore tailings for the manufacture of wood-cement panels intended for civil construction. Fundamental aspects for the characterization of the produced material were evaluated, ensuring its compliance with regulatory requirements, in addition to the implementation and analysis of different curing methods for the composite. The results obtained demonstrated the feasibility of using iron ore tailings in this type of panel, with some treatments meeting the minimum regulatory criteria, particularly those subjected to accelerated carbonation curing. The research conducted is aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), especially Goals 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), 12 (Responsible Consumption and Production), and 13 (Climate Action), by offering a sustainable alternative for the management of ore tailings that goes beyond storage in dams — the predominant method in Brazil for the disposal of this type of material — which is frequently associated with large-scale environmental disasters, notably those that have occurred in Brazil in recent years. Furthermore, the use of industrial waste that would normally be discarded adds value to the material, representing a positive contribution in economic and socio-environmental terms.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1- Aplicações dos painéis de cimento-madeira na construção civil.....	18
Figura 2- Principais zonas de produção de minério de ferro no Brasil	21
Figura 3- Situação atual de uma das áreas atingidas pelo rompimento da barragem do Fundão	22
Figura 4- Antes (A) e depois (B) do local afetado pela lama proveniente do rompimento da barragem da mina do Feijão, em Brumadinho-MG	23
Figura 5- Reação de Carbonatação	26

SEGUNDA PARTE

Figura 1- Representação parcial do método para obtenção do índice de atividade pozolânica	45
Figura 2- Esquema de preparo dos painéis.....	48
Figura 3- Acondicionamento dos painéis para a CA.....	49
Figura 4- Análise de regressão para a variável densidade, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, em g/cm ³	61
Figura 5- Resultado do teste de médias para a variável densidade, para os tratamentos com e sem CA.	61
Figura 6- Absorção de água após 2 e 24 horas nos diferentes tratamentos, com e sem CA.. ..	62
Figura 7- Inchamento em espessura 2h e 24h dos painéis de cimento-madeira.....	63
Figura 8- Micrografias MEV (2350X) dos painéis de cimento-madeira.....	65
Figura 9- Condutividade térmica dos painéis, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, em W/m. °C.....	66
Figura 10- Análise de regressão linear para a variável MOE, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, para os tratamentos com e sem CA, em MPa.	68

Figura 11- Análise de regressão linear para a variável MOR, nos diferentes níveis de substituição de cimento por IOT, para os tratamentos com e sem CA, em MPa	68
Figura 12- Micrografias (100X) dos painéis de cimento-madeira contendo 30% e 10% de RMF	70
Figura 13- Análise de regressão linear para a variável CP, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, para os tratamentos com e sem CA, em MPa.....	72
Figura 14- Análise de regressão linear para a variável LI, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, em MPa.	73
Figura 15- Médias de LI para os painéis de cimento-madeira com e sem CA.....	74
Figura 16- Micrografias MEV (750X) dos painéis de cimento-madeira 0% RMF carbonatado.	75
Figura 17- TGA e DTG dos painéis, de acordo com %RMF e a cura por CA.....	76
Figura 18- Micrografias MEV (2350X) dos painéis de cimento-madeira.....	78

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE

Tabela 1- Quantidade de material em massa para confecção dos corpos de prova para o ensaio de pozolanicidade	46
Tabela 2- Delineamento Experimental	47
Tabela 3- Parâmetros para o cálculo de painéis de cimento-madeira.....	47
Tabela 4- Ensaios normativos para análise das propriedades físicas dos painéis	50
Tabela 5- Caracterização das partículas de <i>Pinus oocarpa</i>	55
Tabela 6- Caracterização químicas do rejeito de minério de ferro.....	56
Tabela 7- Compostos químicos presentes na amostra.	57
Tabela 8- Análise granulométrica do rejeito de minério de ferro.....	57
Tabela 9- - Comparação entre os resultados encontrados no presente trabalho e resultados encontrados na literatura, para a composição química e física do RMF	58
Tabela 10- Resultados dos ensaios para análise da atividade pozolânica da amostra.	59
Tabela 11- ANOVA dos resultados das propriedades físicas.....	60
Tabela 12- ANOVA dos resultados para a propriedade de condutividade térmica.....	65
Tabela 13- ANOVA dos resultados das propriedades mecânicas.	67
Tabela 14- Valores médios com seus respectivos desvios padrão para o MOE, em MPa	67
Tabela 15- Valores médios com seus respectivos desvios padrão para o MOR, em MPa.....	67
Tabela 16- Valores médios com seus respectivos desvios padrão para a CP, em MPa	71
Tabela 17- - Componentes químicos dos painéis, de acordo com o % de RMF e o tipo de cura, com e sem CA	78
Tabela 18- Relação $Ca/(Si+Al)$	79

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE.....	15
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivo Específicos	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1 Painéis de cimento-madeira.....	18
3.2 Mineração.....	20
3.2.1 Rejeitos de mineração.....	21
3.2.2 Aproveitamento do rejeito de mineração.....	23
3.3 Carbonatação Acelerada (CA)	25
4. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	30
REFERÊNCIAS	32
SEGUNDA PARTE - ARTIGO	38
RESUMO	38
ABSTRACT	39
1. INTRODUÇÃO	40
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
2.1 Material.....	43
2.1.1 Partículas de pinus	43
2.1.2 Cimento e Aditivos	44
2.1.3 Rejeito de minério de ferro (RMF).....	44
2.2 Métodos	44
2.2.1 Determinação do índice de atividade pozzolânica.....	44
2.2.2 Análise de atividade pozzolânica das pastas de cimento-rejeito	45
2.2.3 Produção dos Painéis	47
2.2.4 Carbonatação acelerada (CA).....	48
2.2.5 Avaliação das propriedades físicas	49
2.2.6 Avaliação das propriedades mecânicas	50
2.2.6.1 Módulo de elasticidade (MOE) e Módulo de ruptura (MOR)	50

2.2.6.2	Ligação Interna (LI).....	51
2.2.6.3	Resistência a compressão (CP).....	51
2.2.7	Condutividade térmica	52
2.2.8	Análise Microestrutural.....	53
2.2.9	Análise termogravimétrica (TG).....	53
2.2.10	Análise Estatística	53
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1.	Caracterização da madeira	54
3.2.	Caracterização do RMF.....	56
3.3	Atividade Pozolânica.....	59
3.4	Propriedades físicas dos painéis cimento-madeira.....	60
3.5	Condutividade Térmica	65
3.6	Propriedades mecânicas dos painéis de cimento-madeira.....	66
3.6.1	MOE e MOR.....	67
3.6.2	Compressão Paralela (CP).....	71
3.6.3	Ligação Interna (LI).....	72
3.7	Análise térmica por termogravimetria TGA e DTG.....	75
3.8	Análise morfológica e constituintes químicos - MEV-EDS.....	77
4.	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	82

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel fundamental na cadeia produtiva da economia brasileira. Dados do Instituto Brasileiro de Mineração apontam que o setor foi responsável por arrecadar aproximadamente 250 bilhões de dólares no ano de 2022, o que equivale a cerca de 40% da balança comercial brasileira. O minério de ferro é a principal substância extraída, correspondendo a cerca de 61,40% do total de minério exportados (IBRAM, 2023, p. 1).

Normalmente, grande parte desse material é armazenada em barragens de rejeitos (BASTOS *et al.*, 2016; PAPPU; SAXENA; ASOLEKAR, 2007). O modelo atual de exploração do minério, que inclui a armazenagem de rejeitos de minério de ferro em barragens, representa um potencial risco tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade, pois, gera muitos impactos sociais e ambientais (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017, p. 270).

Nos últimos anos, o Brasil enfrentou duas grandes tragédias relacionadas ao tema. Em 2015 uma barragem de armazenamento de rejeito de minério de ferro localizada em Mariana (MG) se rompeu, despejando aproximadamente 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos. Esse material percorreu 663 km ao longo de três rios até alcançar a foz do Oceano Atlântico, causando impactos consideráveis no ecossistema da região, além de prejudicar o abastecimento de água de várias comunidades (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017, p. 2).

Em 2019, a ruptura de outra barragem de rejeito de minério de ferro na cidade de Brumadinho-MG resultou na liberação de aproximadamente 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos (CAVALLINI, 2019). A tragédia causou a morte de 272 pessoas e deixou 3 desaparecidos (ARAÚJO, 2024, p.1).

Portanto, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao aproveitamento dos rejeitos, visando uma melhor destinação, além de agregar valor a esse tipo de material.

O reaproveitamento do resíduo sólido gerado no processo de mineração para a produção de materiais à base matrizes cimentícias representa uma possibilidade ainda pouco explorada

Uma opção de material que utiliza o cimento como matéria-prima são os painéis de cimento-madeira, muito utilizados na construção civil para fechamentos externos e internos (paredes), especialmente em países europeus e asiáticos (IWAKIRI *et al.*, 2015, p. 218).

No Brasil, essa técnica é pouco explorada, mas apresenta um grande potencial, considerando a demanda do setor de construção civil por materiais alternativos de baixo custo, para a produção de habitações em larga escala (IWAKIRI *et al.*, 2015, p. 218).

Os painéis de cimento-madeira são compostos essencialmente por partículas ou fibras de madeira (agregado), cimento Portland (aglomerante) e água. Frequentemente, aditivos químicos são incorporados à mistura, para diminuir o tempo de cura do cimento e agilizar o ganho de resistência (SANTOS *et al.*, 2008, p. 242).

Segundo Moslemi (1974 apud Iwakiri *et al.*, 2015, p. 218), esses painéis oferecem diversas vantagens em comparação com outros produtos, dentre as quais se destacam: resistência ao fogo e às intempéries, bom isolamento acústico, estabilidade dimensional, resistência ao ataque de agentes biológicos, alta resistência em relação ao seu baixo peso e não emissão de resíduos tóxicos durante sua produção.

Contudo, existem desafios relacionados à compatibilidade da matriz cimentícia com materiais lignocelulósicos, uma vez que os álcalis presentes na matriz cimentícia tendem a degradar a matéria vegetal, resultando em perda de resistência ao longo do tempo (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015; URREA-CEFERINO *et al.* 2017).

A aplicação de cura por carbonatação acelerada é uma das formas de aumentar a durabilidade desse tipo de compósito. Essa técnica reduz a alcalinidade da matriz cimentícia, pois reduz o teor de hidróxido de cálcio, melhorando assim a interação entre o reforço de origem vegetal e a matriz cimentícia (SANTOS *et al.*, 2018; TONOLI *et al.*, 2016).

Portanto, ao propor uma abordagem ainda pouco explorada, que envolve o reaproveitamento de rejeitos de minério em materiais cimentícios, aliados a diferentes tipos de cura, este trabalho busca contribuir com a busca por uma produção mais sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da substituição de cimento por rejeito de minério de ferro nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas de painéis de cimento-madeira, bem como avaliar a influência da cura por carbonatação acelerada nas referidas propriedades.

2.2 Objetivo Específicos

- Determinar as características químicas e físicas do rejeito de minério de ferro;
- Caracterizar as partículas de pinus quanto à composição química, física e morfológica;
- Verificar o índice de atividade pozolânica do rejeito de minério de ferro;
- Identificar a quantidade ideal de rejeito de minério de ferro (0%, 10%, 20% e 30%) a ser incorporado, que atenda as normas de comercialização de painéis de cimento-madeira.
- Analisar o efeito da carbonatação acelerada nas propriedades dos painéis, e a interação do rejeito de minério com esse tipo de cura.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Painéis de cimento-madeira

Os painéis de cimento são compostos por uma mistura de cimento e partículas ou fibras de madeira. A combinação desses dois materiais para formar um novo produto tem por princípio beneficiar as características tanto da madeira quanto do cimento. Nesse caso, a resistência e a rigidez tendem a ser superiores no compósito, em comparação com os materiais utilizados isoladamente, pois o cimento transmite as cargas para as partículas de madeira, ao mesmo tempo em que as protege da exposição ao ambiente. Por sua vez, a madeira contribui para o aumento da resistência à tração, reduzir a densidade de massa e os custos (KRÜGER *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2008).

Os painéis de cimento-madeira são amplamente empregados em países europeus e asiáticos, principalmente para realizar fechamentos externos e internos (paredes) em edificações. (IWAKARI *et al.*, 2015, p. 218). A Figura 1 apresenta algumas das possibilidades de aplicação do painel de cimento-madeira na construção civil.

Figura 1 - Aplicações dos painéis de cimento-madeira na construção civil: A) pisos; B) forros; C) paredes divisórias; D) casas pré-fabricadas.



Fonte: BISON (2023).

Contudo, existem algumas variáveis que interferem diretamente nas propriedades de compósitos de cimento-madeira, tais como: o tipo de espécie de madeira e suas características químicas e físicas, o tamanho e geometria das partículas, o tipo de cimento e aditivos utilizados

na mistura, a relação madeira-cimento-água e temperatura (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004, p. 373).

O principal obstáculo a ser superado é a incompatibilidade química entre o aglomerante e a madeira, pois os extrativos presentes na matéria vegetal tendem a retardar, ou até mesmo impedir o processo de hidratação do cimento (ALI; NARS; NAJE, 2020; ASHORI; TARBASA; SEPAHVAND, 2012).

Segundo Frich (1989 apud Latorraca, 2000, p. 21), as espécies coníferas, como o pinus, são mais adequadas do que as folhosas para a produção de painéis de cimento-madeira.

A degradação da fibra vegetal ao longo do tempo, em função da alcalinidade da matriz, é outro fator que interfere diretamente na qualidade dos compósitos de cimento-madeira. A liberação de hidróxido de cálcio (CH) durante o processo de hidratação do cimento atua como um potencial agente de degradação da madeira, promovendo a dissolução de componentes como a hemicelulose (FAN *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2020).

Além disso, a baixa estabilidade dimensional característica das partículas lignocelulósicas prejudica a durabilidade final do material, uma vez que o processo de contração e expansão das partículas ao longo do tempo rompe as ligações na interface partícula/matriz, gerando espaços vazios que influenciam negativamente a resistência mecânica do compósito cimentício (SAWSEN *et al.*, 2015).

Portanto, a garantia de qualidade e durabilidade dos painéis de cimento-madeira passa pela adoção de medidas que visem melhorar a interação entre o cimento e a madeira, que vão desde o tratamento prévio das partículas vegetais, com o objetivo de reduzir ao mínimo a presença de extrativos, até a utilização de materiais e processos de cura capazes de reduzir a alcalinidade da matriz (TONOLI *et al.*, 2019; NA *et al.*, 2014).

Nesse contexto, destaca-se a pesquisa realizada por Lima *et al.* (2020a), que avaliou os efeitos da substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica e metacaulim em condições de envelhecimento natural e acelerado. Os dados da pesquisa apontam para uma maior atividade pozolânica para o metacaulim, evidenciada pelo acréscimo de resistência nos painéis produzidos com esse material após cinco ciclos de envelhecimento acelerado. Esse efeito, conforme mencionado pelos autores, pode ser atribuído à aceleração da atividade pozolânica (LIMA *et al.*, 2020a, p. 5).

Para os painéis produzidos com resíduos de cerâmica, os autores observaram formação de fissuras de retração, quando submetidos a ciclos de envelhecimento (LIMA *et al.*, 2020a, p. 7). De modo geral, os autores verificaram, por meio de análises químicas, que houve redução

na presença de cátions Ca^{2+} na parede celular das partículas vegetais para ambos os tratamentos (LIMA *et al.*, 2020a, p. 9).

Outra pesquisa desenvolvida por Lima *et al.* (2020b) avaliou a durabilidade de painéis de cimento-madeira produzidos com resíduos de pinus, utilizando sílica ativa e cinzas de cascas de arroz em substituição parcial ao cimento. Os painéis produzidos apresentaram um elevado nível de atividade pozolânica, demonstrando a viabilidade do emprego desses dois materiais como substitutos parciais do cimento em compósitos de matrizes cimentícias (LIMA *et al.*, 2020b, p. 9).

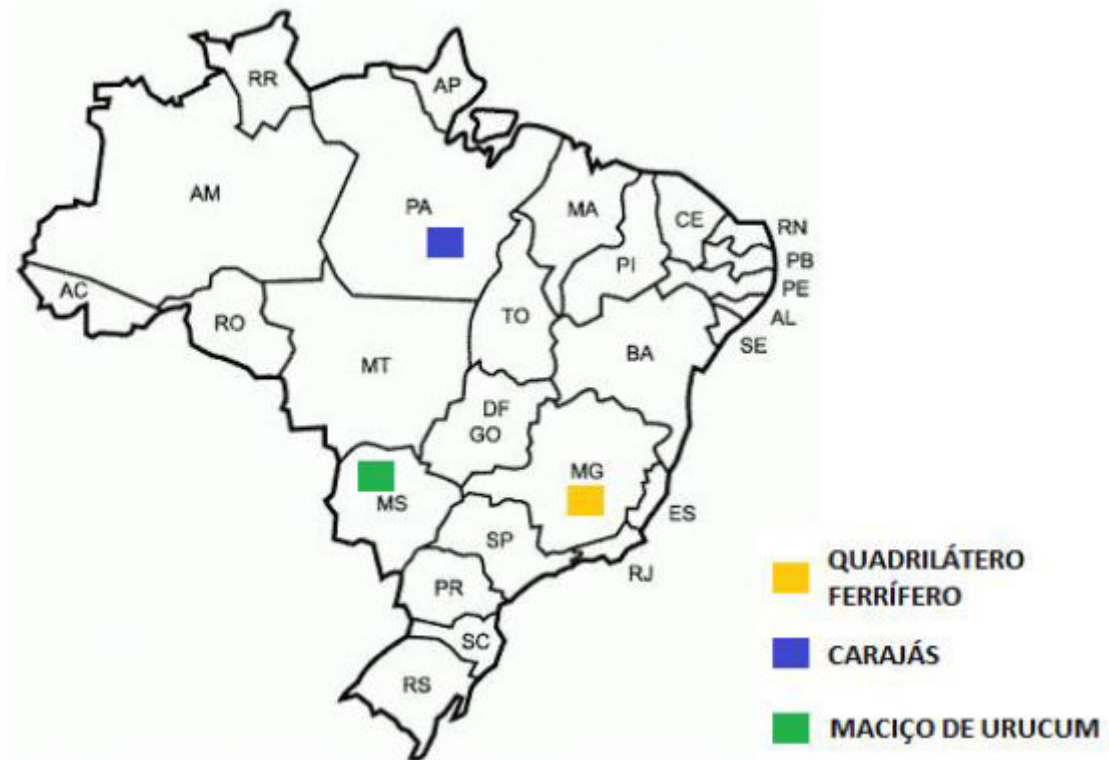
3.2 Mineração

A mineração é uma atividade de relevada importância para a economia brasileira. Em 2022, o setor foi responsável por uma arrecadação de aproximadamente 250 (duzentos e cinquenta) bilhões de dólares, o que equivale a cerca de 40% da balança comercial brasileira. No mesmo ano, o Brasil exportou um volume superior a 358,2 milhões de toneladas de bens minerais, dos quais 61,4% correspondiam ao minério de ferro (IBRAM, 2023, p. 1).

A produção mundial de minério de ferro em 2021 foi liderada pela Austrália, com aproximadamente 900 Gt, seguido pelo Brasil (380 Gt) e China (360 Gt) (UCSG, 2022, p. 85). Embora haja jazidas do minério por todo o território brasileiro, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração, os estados que mais produzem minérios são Minas Gerais e Pará, que juntos produziram cerca de 77,1% da produção nacional em 2022 (IBRAM, 2023, p. 1).

A Figura 2 apresenta os principais locais de extração do minério de ferro no Brasil, são eles: o Quadrilátero Ferrífero, situado na parte centro-sudeste do estado de Minas Gerais; a Província Mineral de Carajás, localizada na porção sudeste do estado do Pará e a região de Corumbá em Mato Grosso do Sul, que faz divisa com o Paraguai e a Bolívia (WAGMACKER, 2019, p. 5).

Figura 2 - Principais zonas de produção de minério de ferro no Brasil.



Fonte: (WAGMACKER, 2019, p. 6).

Nas três regiões citadas, é possível encontrar grandes depósitos das Formações Ferríferas Bandadas (FFB), rochas laminadas constituídas principalmente por minerais de sílica e ferro. (CARVALHO *et al.*, 2014, p. 199).

Dois tipos de minério de ferro são os mais explorados no Quadrilátero Ferrífero, o minério itabirítico e o hematítico. O minério itabirítico é composto por camadas intercaladas de óxidos de ferro e sílica, com teor de ferro entre 20% e 55%. Já o minério hematítico apresenta teor de ferro superiores a 64%, tornando-o mais homogêneo e facilitando sua extração (CARVALHO *et al.*, 2014, p. 199-200).

3.2.1 Rejeitos de mineração

O método de exploração do ferro consiste na separação do “ferro” da sílica, sendo a flotação a principal etapa deste processo. Essa técnica é responsável pela geração de resíduos sólidos com característica arenosa e de baixa granulometria (VILELA, 2019 apud PEREIRA JÚNIOR, 2011, p. 16).

De acordo com Sampaio *et al.* (2001, p. 153), a quantidade de rejeito gerado no beneficiamento do minério de ferro, em 1998, conforme dados da Mineradora Ferteço Minerações S.A., correspondeu a aproximadamente 24,3% do total de matéria-prima utilizada. O teor de ferro contido nesse rejeito foi, em média, de 33,6%.

A maior parte desse material é armazenada em barragens de rejeitos (BASTOS, 2016; PAPPU *et al.*, 2007). A construção dessas barragens pode causar impactos significativos ao meio ambiente devido ao grande volume de material confinado. Em caso de falhas estruturais, os impactos sociais e ambientais podem ser expressivos (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017, p. 282).

Nos últimos anos, no Brasil, os casos de rompimento de barragens demonstraram o potencial devastador do colapso dessas estruturas. Em 2015, a barragem do Fundão, localizada em Mariana (MG), rompeu, despejando aproximadamente 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos, resultando na morte de 19 pessoas. O material percorreu 663 km ao longo de três rios até a foz do Oceano Atlântico, prejudicando diversas espécies aquáticas, além de comprometer o abastecimento de água de várias comunidades (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017, p. 2). A Figura 3 apresenta imagens comparativas de uma das áreas atingidas, na época do acidente e em 2021.

Figura 3 – Situação atual de uma das áreas atingidas pelo rompimento da barragem do Fundão: (A) na época do acidente; (B) em 2021.



Fonte: Fundação Renova (2021).

Em 2019, ocorreu a ruptura de outra barragem de rejeitos de minério de ferro no estado de Minas Gerais, dessa vez na cidade de Brumadinho: a barragem da mina do Feijão. O acidente

provocou a liberação de aproximadamente 12,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos, provocando a morte de 259 pessoas e deixando 11 desaparecidos (CAVALLINI, 2019, p.1). A Figura 4, apresenta imagens da barragem de Brumadinho antes e após a sua ruptura.

Figura 4 - Antes (A) e depois (B) do local afetado pela lama proveniente do rompimento da barragem da mina do Feijão, em Brumadinho-MG.



Fonte: G1 (2019).

3.2.2 Aproveitamento do rejeito de mineração

O alto teor de sílica e ferro presentes no rejeito de minério de ferro evidencia a potencialidade do uso desse material como silicatos na produção de cimento verde e produtos com matrizes cimentícias (YOUNG; YANG, 2019, p. 152).

Nos últimos anos, foram desenvolvidos alguns estudos, com a intenção de aproveitar o rejeito de minério de ferro como matéria-prima na produção de materiais de construção civil.

Vilela et.al (2020, p. 1) produziram blocos de terra comprimida (BTC) com diferentes proporções de rejeito de minério de ferro em substituição ao solo. Os resultados apontaram a capacidade pozzolânica do rejeito de minério de ferro estudado (VILELA et al. 2020, p. 5). A análise das propriedades físicas indicou um efeito significativo da inserção do rejeito de minério, os componentes que foram submetidos ao envelhecimento acelerado apresentaram menores valores de absorção (VILELA et al. 2020, p. 6). Esse resultado foi atribuído pelos autores à redução da porosidade da matriz pela continuidade da cura, bem como ao aumento no fator de empacotamento da mistura promovido pela inserção do rejeito, que diminuiu a quantidade de vazios na matriz (VILELA et al. 2020, p. 7).

Para a resistência a compressão, os dados apresentados por Vilela et.al (2020, p. 8), apontam um efeito significativo apenas para as amostras submetidas ao processo de envelhecimento acelerado. Um aumento considerável na resistência foi observado quando foi inserido na mistura um percentual de 10% de rejeito. Contudo, para inserções acima dessa faixa, observou-se o efeito contrário, com a resistência diminuindo à medida que aumentava a quantidade de rejeito. O aumento da resistência foi atribuído pelos autores ao alto teor de sílica presente no rejeito de minério, que reage com o hidróxido de cálcio formando fases CSH, sendo essa reação mais intensa durante o ciclo de envelhecimento (VILELA, 2020 apud SEKHAR; NAYAK, 2018, p. 8).

Ao avaliar a análise de condutividade térmica, Vilela et.al (2020, p. 9), observaram um aumento no valor dessa propriedade à medida que o rejeito de minério de ferro era introduzido na mistura. Esse resultado foi atribuído pelos autores à maior densidade encontrada nos tijolos produzidos com maiores teores de rejeito, uma vez que, quanto maior a densidade, menor será a porosidade do material e, consequentemente, sua condutividade térmica será maior (VILELA, 2020 apud HANY *et al.*, 2021; MEUKAM *et al.*, 2004, p. 9).

A interação entre a presença de vazios e a composição química dos rejeitos, que apresentaram um alto teor de ferro em sua composição, foi outro fator abordado por Vilela et. al. (2020, p. 9). Segundo Balaj, Mani e Reddy (2017, p. 47 - 48), a condutividade térmica está diretamente relacionada ao teor de argila e cimento na mistura de tijolo de solo-cimento e à densidade final do produto.

Young e Yang (2019, p. 152) realizaram um estudo no qual trabalharam com um tipo de rejeito de minério de ferro, com alto teor de magnésio e baixo teor de sílica, utilizado em substituição à argila para produção de clínquer pelo processo de sinterização convencional. Os autores avaliaram as propriedades do cimento obtido através do clínquer sinterizado a 1420°C, com diferentes adições de rejeito de minério, variando entre 0 e 20% em peso. A inserção de 10% em peso de resíduo de minério teve pouco efeito na formação de fases mineralógicas (YOUNG; YANG, 2019, p. 154). Os testes físico-mecânicos demonstraram que a adição de resíduos de minérios até 10% em peso não afetava negativamente a qualidade dos clínqueres de cimento, pelo contrário, o clínquer produzido obteve um desempenho superior ao convencional, sem resíduo (YOUNG; YANG, 2019, p. 156).

Magalhães, *et al* (2020, p. 1) utilizaram rejeitos de minério de ferro tratados termicamente para a produção de cimentos compostos coloridos. Foram produzidas dez misturas diferentes, nas quais o cimento Portland foi substituído em percentuais que variaram

entre 10% e 30% em relação ao peso. Os resultados encontrados para a condutividade elétrica, presença de compostos químicos e tamanho das partículas confirmaram a atividade pozolânica do material (MAGALHÃES *et al.* 2020, p. 5).

Os resultados obtidos pelos autores, indicaram que o tratamento térmico foi capaz de modificar a coloração do composto. Além disso, a presença do mineral caulinita foi identificada apenas nos resíduos sem tratamento térmico, o que sugere a transformação desse mineral em fase amorfa após submissão ao tratamento térmico, situação confirmada pela análise termogravimétrica (MAGALHÃES *et al.* 2020, p. 6).

Em relação às características físicas e mecânicas, os autores encontraram resultados satisfatórios para a resistência do material, em consonância com as normas brasileiras e internacionais. Ademais, os cimentos produzidos com rejeitos apresentaram menores valores de perda de massa e microestrutura com menos danos sob ataque ácido (MAGALHÃES *et al.* 2020, p. 12).

Narciso (2018, p. 6) avaliou as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de painéis de cimento-madeira produzidos com rejeito de minério de ferro e madeira de *Pinus oocarpa*, bem como os efeitos do envelhecimento acelerado sobre essas propriedades. O resíduo de minério foi utilizado em substituição parcial do cimento, em proporções que variaram entre 10% e 40%.

Os resultados obtidos pela autora, indicaram que não houve interação entre a sílica presente no rejeito de minério e os produtos de hidratação do cimento. O rejeito funcionou mais como elemento de preenchimento de vazios, contribuindo para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas (NARCISO, 2018, p. 67). A maioria dos tratamentos produzidos atendeu aos requisitos de comercialização, mesmo após passarem pelo processo de envelhecimento acelerado, demonstrando a viabilidade da utilização de rejeito de mineração na produção de painéis de cimento-madeira (NARCISO, 2018, p. 67).

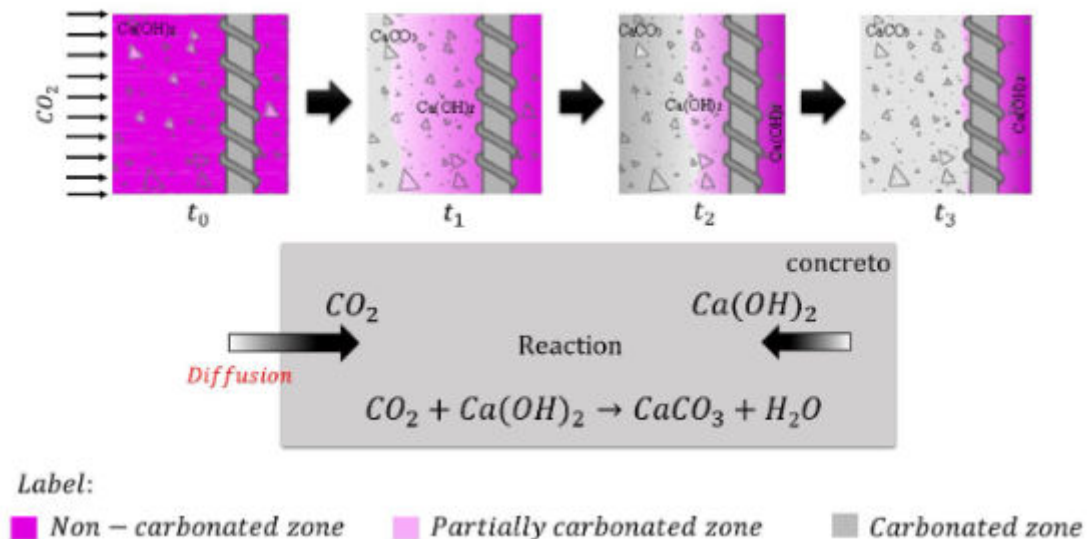
3.3 Carbonatação Acelerada (CA)

A carbonatação é um processo de reação química que ocorre naturalmente entre o gás carbônico (CO₂) presente na atmosfera e os produtos de hidratação do cimento. Quando as argamassas de cimento e concreto são expostas ao CO₂, ocorre a penetração do gás em seu interior, principalmente por meio de poros e microfissuras (LIANG *et al.*, 2020; CARBALLO *et al.*, 2019).

O dióxido de carbono reage com os produtos primários de hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e o silicato de cálcio hidratado (CSH), resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) e sílica gel (ZHANG *et al.*, 2015, p. 1).

A carbonatação é um processo químico que ocorre a partir da neutralização da fase líquida intersticial saturada do Ca(OH)_2 e dos demais componentes hidratados da matriz cimentícia. Ao reagir com a água, o clínquer forma os silicatos CSH, aluminatos (CAH) e sílico-aluminatos (CASH) de cálcio hidratado, produtos insolúveis da reação de hidratação do cimento, além do hidróxido de cálcio. Esses produtos, principalmente o Ca(OH)_2 , reagem com o CO_2 , dando origem ao CaCO_3 e água (TASCA, 2012 apud SCHRODER e SMOLCZYK, 1969, p. 25). A Figura 5 apresenta, de forma simplificada, essa reação química.

Figura 5-Reação de carbonatação.



Fonte: Possan (2010) adaptado por Félix et al. (2017).

Os silicato tricálcico (C_3S) e silicato bicálcico (C_2S) também podem reagir com o CO_2 , gerando CaCO_3 (LIANG *et al.*, 2020; ROSTAMI; SHAO; BOYD, 2012)

O efeito da carbonatação considerando apenas a quantidade de CO_2 presente na atmosfera, é relativamente lento. Para alcançar um parâmetro de carbonatação acelerada, é necessário obter uma atmosfera com alta concentração de CO_2 (KALIYAVARADHAN; LING, 2017; LIANG *et al.*, 2020; TAM *et al.*, 2020).

Para compósitos à base de cimento e materiais lignocelulósicos, a cura por CA apresenta-se como uma estratégia com potencial para minimizar os efeitos negativos provocados pela alcalinidade da matriz cimentícia, tornando o ambiente menos agressivo para

as partículas vegetais, além de reduzir a porosidade do material, o que implica em um melhor desempenho mecânico (SANTOS *et al.*, 2018; TONOLI *et al.*, 2016).

Vários estudos têm buscado identificar os efeitos da CA nas propriedades de compósitos de cimento e materiais lignocelulósicos.

A pesquisa desenvolvida por Bui *et al.* (2021, p. 1) teve como objetivo avaliar os efeitos da CA em argamassas produzidas com cimento Portland e cimento sufoaluminato, reforçadas com fibra de coco, utilizando dois métodos de medição diferentes: medição com reagente fenolftaleína tradicional e análise termogravimétrica (TGA). Para o processo de CA, os autores utilizaram uma concentração de CO₂ igual a 4%, temperatura de 20°C e umidade relativa de 65% por um período de 12 semanas. A carbonatação completa ocorreu na argamassa à base de cimento CSA, enquanto a argamassa à base de cimento Portland foi parcialmente carbonatada, situação observada em ambos os métodos utilizados (BUI *et al.* 2021, p. 5).

Os autores analisaram a eficácia do processo de carbonatação nas mudanças da microestrutura e características mecânicas da matriz cimentícia, por meio de análises da variação da quantidade de CaCO₃ e Ca (OH)₂, bem como da comparação dessas amostras com aquelas curadas sobre condições naturais de temperatura e ambiente (BUI *et al.* 2021, p. 7). Quanto às propriedades mecânicas, os compósitos produzidos com cimento Portland apresentaram um ganho de resistência à compressão e flexão quando submetidos ao processo de CA; entretanto, para os compósitos fabricados com cimento sulfoaluminato de cálcio, o efeito foi o oposto, provocando queda na resistência à compressão e flexão quando as amostras foram submetidas à cura por CA (BUI *et al.* 2021, p. 7).

Segundo os autores, o processo de carbonatação das argamassas à base de cimento CSA foi completo, levando à degradação de etringita em pouco tempo. Essa circunstância pode resultar em uma ligeira diminuição de resistência à compressão nas amostras de CSA após 12 semanas de armazenamento em câmara de carbonatação (BUI *et al.* 2021, p. 7).

Chi *et al.* (2002, p. 16) também verificaram uma relação lógica entre profundidade de carbonatação e a resistência mecânica, concluindo que a resistência à compressão diminui à medida que aumenta a profundidade de carbonatação.

Essa influência pode alterar a estrutura de poros de compósito, que ganha mudanças notáveis após CA. Está claro que esta relação depende significativamente do tipo de aglutinante usado no compósito (ELSALAMAWY *et al.*, 2019; LEEMANN; LOSER, 2019; LIU *et al.*, 2020).

Para as matrizes produzidas a partir de cimento Portland, verifica-se que os poros na amostra são preenchidos, tornando o material mais denso após a carbonatação acelerada (PIZZOL *et al.*, 2014a, 2014b).

A presença de fibras desempenha um papel crítico na alteração das características mecânicas das amostras de argamassa. Pode-se dizer que o processo de carbonatação resulta em uma diminuição do ambiente alcalino na matriz cimentícia. Esta vantagem crítica fornece mais estabilidade química às fibras de celulose devido à menor agressividade do meio (PIZZOL *et al.*, 2014b, p. 102).

Almeida *et al.* (2013, p. 49) avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com celulose de eucalipto produzidos pela técnica de desaguento e prensagem em pasta. Os compósitos foram submetidos ao processo de CA, após 2 dias de cura controlada. Os autores avaliaram o efeito da cura por CA nas propriedades mecânicas, propriedades físicas e microestruturais dos compósitos aos 28 dias, após 200 e 400 ciclos de envelhecimento e um ano de intemperismo natural.

A partir dos resultados encontrados, os autores observaram que a interação entre a redução do teor de Ca(OH)_2 e o aumento no teor de CaCO_3 , a menor porosidade, a maior densidade e o bom desempenho da adesão fibra-matriz proporcionaram um melhor desempenho mecânico após as condições de envelhecimento, contribuindo para a maior durabilidade dos compósitos carbonatados (ALMEIDA *et al.*, 2023, p. 57-58).

Outra pesquisa, desenvolvida por Urrea-Ceferino *et al.* (2017, p. 424), teve como objetivo desenvolver compósitos de fibrocimento de polpa de celulose submetidos à carbonatação supercrítica em uma idade muito precoce. As matérias-primas utilizadas para a criação de misturas compostas de cimento incluíam: cimento Portland, enchimento de calcário e polpa de celulose. Os compósitos foram produzidos por um processo de desaguento de lama a vácuo e submetidos a diferentes condições de cura. Foram estudados o efeito da concentração de carbonatação supercrítica (0% e perto de 100% de CO_2), o efeito da polpa celulósica (não branqueada ou branqueado) e a durabilidade. As amostras foram submetidas a testes mecânicos, físicos e microestruturais.

Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que a redução do tempo de cura de duas horas para uma hora, não provocou um efeito estatisticamente significativo sobre o desempenho mecânico dos compósitos (URREA-CEFERINO *et al.*, 2017, p. 428). No entanto, os resultados do ensaio de flexão dos compósitos carbonatados reforçados com polpa branqueada apresentaram uma melhora estatisticamente significativa em comparação com

aqueles reforçados com polpa não branqueada, com um aumento médio de 24% do módulo de ruptura (URREA-CEFERINO *et al.*, 2017, p. 428).

Segundo os autores, o aumento da resistência está relacionado, em parte, com a variação no teor de lignina entre os dois tipos de fibras empregados, bem como com a maior cristalinidade das fibras branqueadas, uma vez que o processo de branqueamento elimina os componentes amorfos da fibra (URREA-CEFERINO *et al.*, 2017, p. 428). Outros estudos também destacaram que o grau de cristalinidade influencia as propriedades mecânicas das fibras, especialmente o módulo de elasticidade (CHEN *et al.*, 2012; STURCOVA; DAVIES; EICHHORN, 2005).

Kusin *et al.* (2023, p 22188) avaliaram o potencial de utilização de rejeitos de minério de ferro como forma de retirada de CO₂ da atmosfera por meio do processo de carbonatação. O material foi exposto à atmosfera de CO₂, em pressão ambiente, a uma temperatura de 80 °C, por uma hora. A partir dos resultados das análises termogravimétricas e de difração de raio-x, os autores verificaram a produção de carbonatos, como a calcita, siderita, aragonita e vestígios de carbonato de ferro. A quantidade de carbono sequestrado do meio ambiente situou-se entre 33,13 e 49,81g/ kg. Os resultados obtidos neste estudo demonstraram o potencial do uso de resíduos de minério de ferro como meio de reduzir o CO₂ na atmosfera.

4. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A revisão bibliográfica realizada no desenvolvimento deste trabalho apresenta aspectos importantes sobre a produção de painéis de cimento-madeira, o aproveitamento de rejeitos de minério de ferro como matéria-prima para a confecção de materiais à base de cimento e os efeitos da cura através do processo de carbonatação acelerada em compósitos de matriz cimentícia.

Dentre os parâmetros que influenciam a qualidade de painéis de cimento-madeira, destaca-se a degradação sofrida pelas partículas vegetais ao longo do tempo, em função da alcalinidade da matriz cimentícia. Para contornar essa situação, torna-se necessário reduzir o pH da matriz; para tanto, é preciso adotar meios para consumir o Ca(OH)_2 livre, liberado durante o processo de hidratação do cimento. Esse consumo pode ser alcançado por meio de duas estratégias diferentes: a incorporação de materiais com características pozolânicas e a utilização de processos de cura, como a carbonatação acelerada.

As características químicas e mineralógicas dos rejeitos de minério de ferro indicam seu potencial para serem utilizados como pozolana em compósitos cimentícios. Com base nas pesquisas mencionadas, observam-se várias possibilidades de aproveitamento desse rejeito na construção civil, que vão desde a confecção de materiais tais como tijolos e painéis, até a substituição da argila necessária no processo de produção do clínquer.

Diversos estudos apontam o efeito benéfico promovido pela carbonatação acelerada na ligação entre as fibras naturais e a matriz cimentícia, reduzindo a quantidade de vazios ao redor das fibras, aumentando a densidade do material, o que conseqüentemente, favorece as propriedades físicas e mecânicas do compósito. A redução do nível de Ca(OH)_2 , devido a reação com o CO_2 , proporciona um ambiente menos agressivo para as partículas vegetais, refletindo positivamente na durabilidade do compósito.

Nesse contexto, a proposta deste trabalho surge da ideia de produzir um material sustentável a partir do reaproveitamento de rejeitos industriais, com foco na melhoria da interação entre o reforço e a matriz. Para tanto, foi proposto a confecção de painéis de cimento-madeira utilizando o rejeito de minério de ferro como possível material pozolânico, bem como a aplicação da carbonatação acelerada no processo de cura dos compósitos.

Apesar de várias pesquisas apontarem para o uso promissor do rejeito de minério de ferro em combinação com o cimento, ainda existem lacunas a serem preenchidas nesse campo de estudo, tendo em vista a heterogeneidade que esse tipo de rejeito apresenta, em razão de

alguns fatores que influenciam sua composição química, tais como o tipo de processamento, a variação nas frentes de mineração e a localização dentro da barragem de rejeitos.

Nesse sentido, o presente estudo diverge dos demais, pois utiliza como material o rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão, localizada em Mariana (MG). Trata-se, portanto, de um material em condições diferentes e pouco estudado na literatura. A adoção da CA como processo de cura também é um fator que contribui para a originalidade do tema proposto, visto que poucas pesquisas estudaram o efeito desses dois parâmetros em combinação (inserção de RMF e CA), principalmente no contexto da produção de painéis de cimento-madeira.

REFERÊNCIAS

ALI, I. M.; NARS, M. S; NAJE, A.S. Enhancement of cured cement using environmental waste: particleboards incorporating nano slag. **Open Engineering**. v. 10, p. 273-281, 2020.

ALMEIDA, A. E. F. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO, 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.

ARAÚJO, Janaína. Brumadinho 5 anos: familiares de vítimas denunciam demora na punição dos culpados. **Rádio Senado**. Brasília. 23 jan. 2024. Reportagem Premiadas. Disponível em: <<https://brumadinho5anos.com.br/familiares-de-vitimas-denunciam-demora-na-punicao-dos-culpados> — Rádio Senado>. Acesso em: 29 jan. 2024.

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

ASHORI, A.; TABARSA, T.; SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from poplar strands. **Construction and Building Materials**. V. 26, n.1, p.131–134, 2012.

BALAJI, N. C.; MANI, M.; REDDY, B. V. V. Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks. **Construction Materials**, v. 170, n. 1, p. 40–54, 2017.

BASTOS, L. A. C; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016102, 2016.

BISON WOOD-CEMENT BOARD. **Bison Panel Applications**. 16 p. Berlim: Bison Report, 2023. Disponível em: <https://www.bisonpanel.com/brochure-and-guide/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

BUI, H.; BOUTOUIL, M.; LEVACHER, D.; SEBAIB, N. Evaluation of the influence of accelerated carbonation on the microstructure and mechanical characteristics of coconut fiber-reinforced cementitious matrix. **Journal of Building Engineering**, v. 39, n. October 2020, p. 102269, 2021.

CARBALLO, L. Q; PEREZ, M. R.; FERNÁNDEZ, D. C; AMORES, A. C; RODRÍGUEZ, J. M. F. Optimum Particle Size of Treated Calcites for CO₂ Capture in a Power Plant. **Materials**, v. 12, p. 1–17, 2019.

CARVALHO P. S. L; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R.; MOZKOWICZ, J. Minério de ferro. **BNDES Setorial**, v 39, p. 197 – 234, 2014.

CAVALLINI, Marta. Mina que abriga barragem em Brumadinho responde por 2% da produção da Vale; veja raio-X. **G1/ Globo**. Rio de Janeiro. 28 jan. 2019. Economia. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/01/28/mina-que-abriga-barragem-em-brumadinho-responde-por-2-da-producao-da-vale-veja-raio-x-g1-globo>>

brumadinho-responde-por-2-da-producao-da-vale-veja-raio-x.ghml.>. Acesso em: 3 mar. 2023.

CHEN, Y.; WAN, J.; ZHANG, X.; MA, Y.; WANG, Y. Effect of beating on recycled properties of unbleached eucalyptus cellulose fiber. **Carbohydr. Polym**, v. 87, p. 730-736, 2012.

CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 14–19, 2002.

ELSALAMAWY, M.; MOHAMED, A. R.; KAMAL, E. M. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, n. 4, p. 1257–1264, 2019.

FAN, M.; NDIKONTAR, M. K.; ZHOU, X.; NGAMVENG, J. N. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 135-140, 2012.

FÉLIX, E. F.; CAZARREDO, R.; POSSAN, E. Parametric analysis of carbonation process in reinforced concrete structures through Artificial Neural Networks. **Revista ALCONPAT**, v (7), p. 302–316, 2017.

FRICH, E. **The Bison system for production of wood cement particleboards**. In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials. Session III: Industrial Manufacturing Processes. USA. v. 1, p. 63-67, 1989.

FUNDAÇÃO RENOVA. Fundação Renova conclui revegetação de áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão. **Jornal Folha 1**. 2021. Baixo Guandu/ ES. Caso Samarco. Disponível em: <https://jornalfolha1.com.br/2021/07/09/fundacao-renova-conclui-revegetacao-de-areas-afetadas-pelo-rompimento-da-barragem-de-fundao/>. Acesso em: 13 dez. 2023.

G1. Fundação Brumadinho antes e depois: veja imagens do rompimento de barragem da Vale. **G1/ Globo**. Belo Horizonte. 25 jan. 2019. Minas Gerais. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/antes-e-depois-veja-imagens-do-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg.ghml>. Acesso em: 03 jun. 2023.

HANY, E; FOUAD, N.; ABDEL-WAHAB, M.; SADEK, E. Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122535, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Infográfico Mineração em números 2022, 2023**. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em: 15 dez. 2023.

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. **Rev. de 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 Roh Werkst**, v.62, p. 370–377, 2004.

KALIYAVARADHAM, S.K.; LING, T. C. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C & D) waste- An overview. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 20, p. 234-242, 2017.

KRÜGER, E. L.; ADRIAZOLA, M.; MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Thermal analysis of wood – cement panels: Heat flux and indoor temperature measurements in test cells. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2299–2305, 2009.

KUSIN, M. F.; HASAN, S. N. M. S.; MOLAHID, V. L. M.; MOHAMAT-YUSUFF, F.; JUSOP, S. Carbon Dioxide sequestration of iron ore mining waste under low-reaction condition of a direct mineral carbonation process. **Enviromental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 22188-22210, 2023.

LACAZ, F.A.C., PORTO, M.F.S., PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/ Samarco. **Rev. Bras. Saúde Ocup**, v. 42, 2017.

LATORRACA, João Vicente de Figueiredo. **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira**. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LEEMANN, A.; LOSER, R. Carbonation resistance of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 335–341, 2019.

LIANG, C.; PAN, B.; MA, Z.; HE, Z.; DUAN, Z. Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103446, 2020.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S.; SATYANARAYANA, K. G.; LOMELÍ-RAMÍREZ, M. G. Preparation and characterization of wood-cement particleboards produced using metakaolin, calcined ceramics and residues of Pinus spp. **Journal of Building Engineering**, v 32, p. 1-10, 2020a.

LIMA. A. J. M.; IWAKIRI, S.; SATYANARAYANA, K. G.; LOMÉLI-RAMÍREZ, M. G. Studies on the durability of wood-cement Particleboards Produced with Residues of Pinus ssp., Silica fume, and Rice Husk Ash. **Bioresources**. v 15, n.2, 2020b.

LIU, Y.; CHOW, C. W. K.; KEEGAN, A.; LI, D.; PHAM, P. N.; HUANG, J.; SIDDIQUE, R. Properties and microstructure of concrete blocks incorporating drinking water treatment sludge exposed to early-age carbonation curing. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121257, 2020.

MAGALHÃES, L.F.; FRANÇA, S.; OLIVEIRA, M. S.; PEIXOTO, R. A. F.; BESSA, S. A. L.; BEZERRA, A. C. S. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**. v. 274, p. 123260, 2020.

MEUKAM, P.; JANNOT, Y.; NOUMOWE, A.; KOFANE, T. C. Thermo physical characteristics of economical building materials. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 437–443, 2004.

MOLESMI, A. A. **Particleboard**. Vol. 1. Carbondale, Illinois: Southern Illinois University Press, 1974.

NA, B; WANG, Z; WANG, H; LU. X. Wood-cement compatibility review. **Wood Research**, v 59, n. 5, p. 813–826, 2014.

NARCISO, Caroline Rezende Pinto. **Influência do resíduo de minério de ferro na produção de painéis de cimento-madeira**. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

PAPPU, A.; SAXENA, M.; ASOLEKAR, S. R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and Environment**, v. 42, p. 2311–2320, 2007.

PASSOS, F. L.; COELHO, P.; DIAS, A. (Des)territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento da barragem de Mariana, MG. **Caderno Metrópole**, v. 19, n. 38, p. 269–297, 2017.

PEREIRA JÚNIOR, Schubert Soares. **Desenvolvimento de argamassas contendo resíduos arenosos de mineração e estudos de suas propriedades visando sua utilização**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais). Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2011.

PIZZOL, V. D.; MENDES, L. M.; FREZZATI, L.; SAVASTANO, 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, 2014b.

PIZZOL, V. D.; MENDES, L. M.; SAVASTANO, H.; FRIAS, M.; DÁVILA, F. J.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M.; TONOLI, G. H. D. Mineralogical and microstructural changes promoted by accelerated carbonation and ageing cycles of hybrid fiber – cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 750–756, 2014a.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 265p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A. J. Carbonation Curing versus Steam Curing for Precast Concrete Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 9, p. 1221-1229, 2012.

SAMPAIO, J. A; LUZ, A. B; LINS, F. F. **Usinas de beneficiamento de minério no Brasil**. Rio de Janeiro: CTEM/ MCT, 2001.

SANTOS, M. F.; MENEZES, R. A.; OLIVEIRA, E. A.; BRASIL FILHO, E. A. R.; LAVOR, D. A. Estudo do efeito da carbonatação no concreto produzido com fibra vegetal (buriti).

ITEGAM-JETIA: Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications. Manaus, v. 4, n. 13, p. 184-189, 2018.

SANTOS, R. C.; MENDES, L.M.; MORI, F.A.; MENDES, R. F. Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**. Lavras, v. 14, n. 3, p. 241- 250, 2008.

SAWSEN, C.; FOUZIA, K.; MOHAMED, B.; MOUSSA, G. Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 229–235, 2015.

SCHRÖDER, F.; SMOLCZYK, H.G. Carbonation and protection against steel corrosion. In.: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5., 1968, Tokyo. Proceedings... Tokyo:1969. 4v., v.4, p.188-198. (Part IV).

SEKHAR, D. C.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 531–536, 2018.

STURCOVA, A.; DAVIES, G. R.; EICHHORN, S. J. Elastic modulus and stress-transfer properties of tunicate cellulose whiskers. **Biomacromolecules**, v. 6, p. 1055-1061, 2005.

TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N.; LI, W. Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118903, 2020.

TASCA, Maisson. **Estudo da carbonatação natural de concretos com Pozolanas: Monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TONOLI, G. H. D, CARMELO, G. F; FIORONI, C.A., PEREIRA, T. L., ROCHA, G., SOUZA, R. B., JONH, V. M., SAVASTANO JR, H. Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 22–29, 2019.

TONOLI, G. H. D.; PIZZOL, V. D.; URREA, G.; SANTOS, S. F.; MENDES, L. M.; SANTOS, V.; JOHN, V. M.; FRIAS, M.; SAVASTANO JUNIOR, H. Rationalizing the impact of aging on fiber–matrix interface and stability of cement-based composites submitted to carbonation at early ages. **Journal of Materials Science**, v. 51, p. 7929-7943, 2016.

URREA-CEFERINO, G. E.; REMPE, N.; SAVASTANO, H. 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.

VILELA, A. P.; EUGÊNIO, T. M. C.; OLIVEIRA, F. F.; MENDES, J. F.; RIBEIRO, A. G. C.; VAZ, L. E. V. S. B; MENDES, R. F. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120883, 2020.
WAGMACKER, Diogo Nascimento. **Estudo sobre a influência da adição de resíduo de minério de ferro da barragem de Fundão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

YOUNG, G.; YANG, M. Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 152–156, 2019.

ZHANG, J.; SHI, C.; LI, Y.; PAN, X.; POON, C.; XIE, Z. Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 11, p. 04015029, 2015.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Proposto para o periódico *Construction and Building Materials*

EFEITO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PAINÉIS DE CIMENTO- MADEIRA PRODUZIDOS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

RESUMO

A extração de minério de ferro é uma atividade importante para a economia brasileira, contudo, o beneficiamento de minério gera um volume acentuado de resíduos, que usualmente é armazenado em forma de barragens de rejeitos. No Brasil, o rompimento de duas dessas barragens, nas cidades de Mariana-MG e Brumadinho-MG, causaram a morte de centenas de pessoas, além de despejar milhões de toneladas de rejeito no meio ambiente. Portanto, torna-se crucial adotar formas mais seguras de manejo e reaproveitamento desse material. O presente estudo avaliou o desempenho físico, mecânico e térmico de painéis de cimento-madeira produzidos com partículas de *Pinus oocarpa* e diferentes proporções de rejeito de minério de ferro (RMF), em substituição ao cimento, nas proporções de 0%, 10%, 20% e 30%. Os efeitos da cura por carbonatação acelerada (CA) também foram investigados, para avaliar a interação do rejeito e sua capacidade de formar carbonatos. Para tanto, uma parte dos painéis foram expostos a atmosfera concentrada de CO₂, pressão de 1,5 kgf/cm² em temperatura ambiente, por um período de 24 horas. A atividade pozolânica do rejeito de minério foi avaliada a partir dos ensaios descritos na NBR 15895 e NBR 5752. As propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram obtidas e comparadas com especificações contidas no processo BISON. A composição química dos painéis foi avaliada através de termogravimetria e microscopia de varredura (MEV) com análise EDS. Para os painéis carbonatados foi possível observar uma redução no inchamento (~-15%) e absorção de água (~-10%) e um aumento (~+47%) nas propriedades mecânicas (todos $p < 0,05$). Não foram observadas alteração significativa na condutividade térmica, relativa ao percentual de RMF ou ao tipo de cura adotado ($p > 0,05$). A interação entre o teor de RMF e CA foi significativa apenas para as propriedades mecânicas ($p < 0,05$), indicando uma tendência de crescimento de resistência a partir da cura por CA mais evidente para os painéis confeccionados com maiores porcentagens de rejeito. Todos os tratamentos atenderam aos requisitos de comercialização relacionados às propriedades de inchamento em espessura e ligação interna em 2h e 24h, bem como atingiram valores satisfatórios para o módulo de elasticidade (MOE), após cura por carbonatação acelerada. Com relação ao módulo de ruptura (MOR), apenas o tratamento com 30% de RMF alcançou o valor mínimo de 9MPa, estabelecido pelo processo BISON, após CA. Os resultados sugerem que é viável utilizar o RMF para a produção de painéis de cimento-madeira. Em larga escala, o aproveitamento desse rejeito promove uma melhor destinação para o material, ajuda a resolver o problema que as barragens se tornaram, além de beneficiar a indústria da construção civil, a partir da redução dos custos de produção.

Palavras-chave: resíduo de mineração, compósito, material lignocelulósico.

ABSTRACT

The extraction of iron ore is a critically important activity for the Brazilian economy. However, the ore processing generates a large volume of waste, typically stored in dams. In Brazil, the collapse of two such dams, in the cities of Mariana-MG and Brumadinho-MG, tragically resulted in hundreds of deaths and released millions of tons of waste into the environment. Therefore, adopting safer methods for managing and reusing this waste is crucial. This study evaluated the physical, mechanical, and thermal performance of wood-cement panels produced with *Pinus oocarpa* particles and varying proportions of iron ore tailing (IOT), replacing cement at 0%, 10%, 20%, and 30%. We also investigated the effects of accelerated carbonation (AC) curing to assess the waste's interaction and its ability to form carbonates. For this, a portion of the panels was exposed to a concentrated CO₂ atmosphere at 1.5 kgf/cm² pressure and room temperature for 24 hours. The pozzolanic activity of the ore waste was evaluated based on tests described in NBR 15895 and NBR 5752. The IOT analyzed did not meet the minimum requirements to be classified as pozzolan. The physical and mechanical properties of the panels were obtained and compared with specifications from the BISON process and other available standards. The chemical composition of the panels was evaluated using thermogravimetry analyses and scanning electron microscopy (SEM) with EDX analysis. For carbonated panels, we observed a reduction in swelling (~15%) and water absorption (~10%), along with a significant increase (~47%) in mechanical properties (all $p < 0.05$). No significant changes were observed in thermal conductivity, regardless of the IOT percentage or the curing method adopted ($p > 0.05$). The interaction between IOT content and AC was significant only for mechanical properties ($p < 0.05$), indicating that the resistance growth from AC curing was more evident for panels with higher percentages of waste. All treatments met commercialization requirements for thickness swelling and internal bonding at 2 hours and 24 hours. They also achieved satisfactory values for the modulus of elasticity (MOE) after accelerated carbonation curing. Regarding the modulus of rupture (MOR), only the treatment with 30% IOT reached the minimum value of 9 MPa established by the BISON process after AC. These results suggest that using IOT to produce cement-wood panels is viable. Such panels can be applied in civil construction for flooring, ceilings, partitions, and more. On a large scale, utilizing this waste promotes better material disposal, helps resolve the problems posed by dams, and benefits the construction industry by reducing production costs.

Key words: mining residue, composite, lignocellulosic material.

1. INTRODUÇÃO

A atividade de mineração é um setor de elevada importância para a economia brasileira. Em 2022, a arrecadação gerada pelo setor representou aproximadamente 40% da balança comercial do país. No mesmo ano, o Brasil exportou um volume de mais de 358,2 milhões de toneladas de bens minerais, dos quais 61,4% corresponderam ao minério de ferro (IBRAM, 2023, p. 1).

Os principais locais de extração do minério de ferro no Brasil, são: o Quadrilátero Ferrífero, situado na parte centro-sudeste do estado de Minas Gerais; a Província Mineral de Carajás, localizada na porção sudeste do estado do Pará e a região de Corumbá em Mato Grosso do Sul, que faz divisa com o Paraguai e a Bolívia (WAGMACKER, 2019, p. 5). O método de exploração do ferro consiste na separação do “ferro” da sílica. Entre as várias etapas desse processo, destaca-se a flotação, responsável pela geração de resíduos sólidos com característica arenosa e de baixa granulometria (VILELA, 2019 *apud* PEREIRA JÚNIOR, 2011, p. 16).

Normalmente, os resíduos gerados no beneficiamento do minério de ferro são armazenados na forma de barragens de rejeitos (BASTOS, 2016; PAPPU *et al.*, 2007). A construção dessas barragens pode causar muitos impactos ao meio ambiente, devido ao acentuado volume de material confinado em seu interior. Em caso de falhas, esses impactos podem ser significativos tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017, p. 282).

Os recentes rompimentos de barragens ocorridos no Brasil nos últimos anos demonstraram o potencial devastador do colapso dessas estruturas. Em 2015, o rompimento da barragem do Fundão, localizada no município de Mariana-MG, causou a morte de 19 pessoas e despejou aproximadamente 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos. Esses rejeitos percorreram 663 km ao longo de três rios até a foz do Oceano Atlântico, prejudicando a existência de diversas espécies aquáticas e o abastecimento de água de várias comunidades (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017, p. 2).

Em janeiro de 2019, o rompimento da barragem da Mina do Feijão, em Brumadinho-MG, liberou cerca de 12,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos, resultando na morte confirmada de duzentos e sessenta e sete pessoas, enquanto três pessoas permanecem desaparecidas (MANSUR, 2023, p. 1). Diante disso, torna-se essencial buscar alternativas mais seguras para a destinação desses rejeitos, a fim de evitar novas tragédias desse tipo.

Por ser um material com alto teor de sílica e ferro, o rejeito de minério de ferro (RMF) apresenta potencial para ser utilizado como silicatos na fabricação de produtos com matrizes cimentícias (YOUNG; YANG, 2019, p. 152).

Pesquisas desenvolvidas nos últimos anos apresentaram resultados promissores para compósitos de matrizes cimentícias incorporados com rejeito de minério de ferro.

Vilela *et al* (2020, p. 1) encontraram resultados favoráveis para as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de tijolos de solo-cimento produzidos com esse tipo de rejeito. Young & Yang (2019, p. 1), por meio de seus estudos, demonstraram a viabilidade de utilizar o rejeito de minério de ferro com alto teor de magnésio na composição do clínquer, em substituição da argila.

Magalhães *et al.* (2020, p. 1) utilizando rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar na produção de cimentos coloridos, obtiveram resultados favoráveis, indicando redução na perda de massa e menor dano à microestrutura do material, quando submetido ao ataque de ácido.

Nesse contexto, um material passível de ser fabricado a partir da atuação conjunta do cimento com o RMF são os painéis de cimento-madeira. Esse tipo de painel tem como base o cimento, reforçado com partículas ou fibras de madeira, além de água e aditivos controladores de pega. Desde o final dos anos setenta e início da década de oitenta, esses materiais têm sido utilizados como uma alternativa de elemento construtivo (IWAKARI *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2008).

A inserção de material vegetal na matriz cimentícia proporciona um aumento na resistência à flexão e melhora o comportamento pós-fissuração. (LEBORGNE; GUTKOWSKI, 2010). Contudo, alguns fatores precisam ser contornados a fim de garantir a qualidade e durabilidade do compósito, como: a incompatibilidade entre o cimento e a madeira, devido à presença de componentes químicos na madeira que retardam o processo de hidratação do cimento, como os extrativos, e a degradação da partícula vegetal ao longo do tempo, em função do elevado teor álcalis liberados durante o processo de hidratação (LATORROCA, 2000; BERALDO *et al.*, 2002).

A interação entre a partícula vegetal e a matriz de cimento pode ser aprimorada a partir da escolha de madeiras com propriedades químicas compatíveis com cimento, como por exemplo, a madeira de pinus (LATORROCA, 2000 *apud* FRICH, 1989).

A inserção de pozolanas na mistura e a utilização de cura por carbonatação acelerada (CA) são outras estratégias empregadas para reduzir o pH da matriz, garantido assim maior durabilidade à partícula vegetal.

As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos capazes de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) livre, liberado durante a reação de hidratação do cimento, formando compostos estáveis (BOTCHWAY; AFRIFA; HENAKU, 2020 *apud* GRAM, 1983).

Por sua vez, a carbonatação é um processo de reação química que ocorre naturalmente entre o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e os produtos de hidratação do cimento. Quando as argamassas de cimento e concreto são expostas ao CO_2 , o gás penetra em seu interior, principalmente por meio de poros e microfissuras. O dióxido de carbono reage com os produtos primários formados a partir da reação de hidratação do cimento, como o Ca(OH)_2 e silicato de cálcio hidratado (CSH), resultando em carbonato de cálcio (CaCO_3) e sílica gel (LIANG *et al.*, 2020; CARBALLO *et al.*, 2019).

O efeito da carbonatação considerando apenas a quantidade de CO_2 presente na atmosfera, é relativamente lento. Para alcançar um parâmetro de CA, é necessário obter uma atmosfera com alta concentração de CO_2 . Além disso, existem outros fatores que afetam o processo de carbonatação, dentro os quais podemos citar: pressão atmosférica, temperatura, umidade e composição química do cimento (KALIYAVARADHAN; LING, 2017; LIANG *et al.*, 2020; TAM *et al.*, 2020).

A carbonatação produz mudanças importantes nas matrizes cimentícias, como a redução da porosidade e da permeabilidade, menor conectividade entre os poros, maior superfície específica, entre outras propriedades. No entanto, o efeito desse impacto na microestrutura ainda não tem uma resposta pacificada entre os estudiosos (MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014, p. 153).

Cabral *et al.* (2018, p. 52), ao trabalharem com painéis produzidos a partir da madeira de balsa e cimento, observaram um aumento considerável na resistência à flexão, a partir da submissão das amostras à cura por CA por um período de 24 horas. Os valores de MOE (módulo de elasticidade) e MOR (módulo de ruptura) alcançaram resultados, respectivamente, 38% e 23%, maiores que o tratamento controle.

Chen *et al.* (2020, p. 1) avaliaram os efeitos da inserção de cinzas volantes provenientes da queima de carvão em usina termoeletrica e da incineração de lodo de esgoto, escória de alto-forno e resíduo de concha de mexilhão nas propriedades físicas e mecânicas de painéis de cimento de magnésio e resíduo de formas de madeira, utilizadas na construção civil.

Os painéis produzidos receberam dois tipos de cura diferentes: ao ar e através de CA. Os resultados demonstraram que inserção de cinzas volantes melhora o desempenho mecânico dos painéis a partir da cura convencional, devido às reações pozolânicas. Contudo, o mesmo efeito não foi observado quando estes painéis passaram pelo processo de CA, uma vez que a CA consumiu hidróxido, prejudicando a reação pozolânica. Os painéis produzidos com escória de alto-forno apresentaram o efeito contrário: os painéis curados de forma convencional apresentaram menores valores de resistência, uma vez que a formação de C-S-H inibiu a hidratação do MgO. No entanto, ao passar pelo processo de cura por CA, houve uma melhoria nas propriedades do material (CHEN *et al.*, 2020, p. 7).

As pesquisas apontam para um uso promissor do RMF em combinação com o cimento. Entretanto, ainda existem lacunas a serem exploradas neste campo de estudo, especialmente devido à diversidade que esse tipo de rejeito apresenta, principalmente em relação à composição química. Esta, por sua vez, é influenciada por uma série de fatores, como o tipo de processamento adotado, a variação nas frentes de mineração e a localização do rejeito dentro da barragem.

Nesse sentido, o presente estudo se diferencia dos demais, pois utiliza como matéria-prima o rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão, localizada em Mariana (MG). Esse material apresenta condições distintas e carece de mais estudos. A adoção da CA também é um fator que contribui para a originalidade do tema proposto, uma vez que são poucas as pesquisas que investigaram a combinação desses dois parâmetros (inserção de RMF e CA), especialmente no contexto da produção de painéis de cimento-madeira.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é avaliar os efeitos da inserção de RMF em substituição ao cimento, assim como a influência de dois tipos de cura, convencional e por CA, nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas de painéis cimento-madeira.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

2.1.1 Partículas de pinus

As partículas foram obtidas a partir da laminação de toras de *Pinus oocarpa*, extraídas no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As lâminas de madeira passaram por um processo de moagem em moinho martelo, para serem transformados em partículas do tipo

sliver. Em seguida, as partículas foram peneiradas para obter um material com granulometria entre 0,64mm e 2mm.

A análise anatômica da madeira de pinus foi realizada conforme recomendações de Muniz e Coradin (1991) e de acordo com a norma IAWA *Committe* (1989, p. 269). Para isso, foram realizadas medições do comprimento e diâmetro das partículas, adotando-se uma base amostral de 30 medições, feitas com o auxílio do Software Image J. A razão de aspecto das partículas foi determinada pela relação entre comprimento e o diâmetro.

2.1.2 Cimento e Aditivos

Cimento Portland do tipo CP V-ARI foi utilizado como aglomerante, adquirido no comércio local de Lavras-MG. Cloreto de cálcio foi utilizado como aditivo para acelerar o endurecimento e a pega do cimento, conforme descrito por Latorraca (2000, p. 133).

2.1.3 Rejeito de minério de ferro (RMF)

O RMF foi proveniente do rompimento da barragem do Fundão, localizada na cidade de Mariana – MG. A caracterização do RMF foi realizada no Laboratório de Análise de Solos da UFLA. Os teores dos principais constituintes químicos presentes na amostra foram determinados por fluorescência de raio-X, utilizando o equipamento S1 Titan-Bruker.

2.2 Métodos

2.2.1 Determinação do índice de atividade pozolânica

O índice de atividade pozolânica do RMF foi determinado utilizando o Método Chapelle Modificado, de acordo com a NBR 15895 (2010, p. 4).

O método consiste em misturar o material pozolânico com óxido de cálcio (CaO) na proporção de 1:2 (em massa) em um recipiente contendo 250 ml de uma solução de sacarose (240 g/l). A mistura é mantida sob agitação em um banho termostático à temperatura de 90 ± 5 °C por 16 horas (Figura 1a). Após esse período, o material é filtrado, e o teor residual de CaO é determinado por titulação com solução de ácido clorídrico (HCl 0,1 M), utilizando fenolftaleína como indicador (Figura 1b).

O resultado é expresso em miligramas de CaO fixados por grama de material pozolânico, sendo que, quanto maior a fixação, maior reatividade do material. O cálculo do índice de atividade pozolânica Chapelle é dado pela Equação 1.

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2) \cdot Fc}{m_2} \cdot 1,32 \quad (1)$$

Em que:

$I_{Ca(OH)_2}$ é o índice de atividade pozolânica Chapelle.

V_2 é o volume de solução de HCl 0,1 M consumido no ensaio com a amostra, em mililitros (ml).

V_3 é o volume de solução de HCl 0,1 M consumido no ensaio em branco, em mililitros (ml).

Fc é o fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 M.

1,32 é a relação molecular $Ca(OH)_2/CaO$.

Figura 1 – Representação parcial do método para obtenção do índice de atividade pozolânica.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: (a) = materiais em banho-maria termostático; (b) = titulação com ácido clorídrico.

2.2.2 Análise de atividade pozolânica das pastas de cimento-rejeito

Dois tipos de argamassas de cimento e areia foram preparados de maneira distinta, conforme a NBR 5752 (2014, p. 3). A primeira, contendo apenas cimento e areia (argamassa A) e a segunda, contendo cimento, areia e RMF, com uma proporção de 25% de RMF em relação ao peso de cimento (argamassa B). As quantidades de materiais adicionados em cada tratamento estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1- Quantidade de material em massa para confecção dos corpos de prova para o ensaio de pozolanicidade.

Material	Massa para as misturas (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland CPII F 32	624	468
RMF	-	156
Água	300	300
Areia normal - fração grossa	468	468
Areia normal - fração média grossa	468	468
Areia normal - fração média fina	468	468
Areia normal - fração fina	468	468

Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF: rejeito de minério de ferro.

Para cada tratamento, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos com dimensões iguais a 50 x 100 mm (diâmetro x altura). O processo de fabricação e ruptura dos corpos de prova seguiram as recomendações da NBR 7215 (1996, p. 3).

Após a moldagem, os corpos de prova foram acondicionados em sacos plásticos selados, para evitar a perda de umidade, e, em seguida, imersos em uma solução de água e cal até a data de ruptura. O ensaio de compressão foi realizado em prensa hidráulica elétrica digitalizada, a uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s.

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi determinado conforme a Equação 2.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} .100 \quad (2)$$

Em que:

I_{cimento} é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa B.

f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa A.

2.2.3 Produção dos Painéis

Os painéis de cimento-madeira-rejeito foram produzidos conforme delineamento experimental descrito na Tabela 2. Foram estabelecidos quatro percentuais de inserção de RMF (0%, 10%, 20% e 30%) em substituição parcial ao cimento, considerando a massa seca, e dois tipos de cura (com e sem CA). Os parâmetros utilizados no cálculo das quantidades necessárias para a produção dos painéis estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 2 - Delineamento Experimental.			
Tratamento	% de cimento	% de RMF	% madeira
0%-SC	100%	0%	40%
0%-CC	90%	10%	40%
10%-SC	80%	20%	40%
10%-CC	70%	30%	40%
20%-SC	100%	0%	40%
20%-CC	90%	10%	40%
30%-SC	80%	20%	40%
30%-CC	70%	30%	40%

Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada.

Tabela 3- Parâmetros para o cálculo de painéis de cimento-madeira.	
PARÂMETROS	RELAÇÃO
Densidade	1,3 g/cm ³
Madeira: Cimento	1:2,5
Madeira:Cimento:RMF	1:2,25;0,25/ 1:2:0,50/ 1:1,75:0,75
Água: Cimento	1:2,5
Taxa de hidratação do cimento	0,25
Aditivo (CaCl ₂)	3%

Fonte: Da autora (2024).

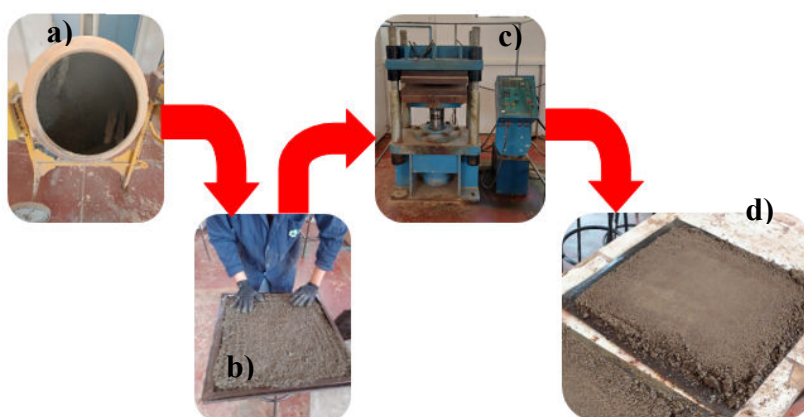
Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; CaCl₂ = cloreto de cálcio.

Após os cálculos, os materiais foram pesados e, em seguida, misturados em uma betoneira, obedecendo à seguinte ordem: inicialmente, foram adicionadas as partículas de madeira; logo após, o cimento e RMF. A mistura foi então homogeneizada, e a água, com o

aditivo previamente misturado, foi adicionada utilizando-se um recipiente com sistema pressurizado, aspergindo-a sobre a mistura. Em seguida, o material foi removido da betoneira, pesado e moldado para a prensagem. Os painéis foram prensados em temperatura ambiente, com uma pressão igual a 4 Mpa, e permaneceram grampeados por 24 horas para posterior desmoldagem.

Após a desmoldagem, os painéis foram acondicionados em uma sala de climatização, com temperatura de 20 ± 2 °C e umidade do ar de $65 \pm 3\%$, sendo separados por tabicas. Finalizado o tempo de cura, os painéis foram esquadrejados para remover qualquer efeito de borda causado no processo de fabricação, e, posteriormente, os corpos de prova foram retirados por meio de uma serra circular. O esquema de fabricação dos painéis é demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de preparo dos painéis.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: (a) mistura dos materiais em betoneira; (b) espalhamento de material nos moldes; (c) prensagem; (d) painel.

2.2.4 Carbonatação acelerada (CA)

A cura por CA ocorreu após três dias de fabricação dos painéis, para que estes atingissem resistência mínima necessária para a retirada dos corpos de prova. As amostras de painéis foram acondicionadas em uma autoclave conectada, por meio de um mangote, a um cilindro de CO₂ de grau industrial com pureza de 99%, conforme esquema demonstrado na Figura 3a e 3b. A pressão aplicada foi igual a 1,5 Kgf/cm² à temperatura ambiente.

Os painéis foram expostos a atmosfera de CO₂ por um período de 24h. Finalizado o processo, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climatizada, com temperatura de 20±2°C e umidade relativa de 65±3%, para aguardar a cura completa antes da realização dos ensaios físicos, térmicos e mecânicos aos 28 dias.

Figura 3 – Acondicionamento dos painéis para a CA.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: (a) autoclave utilizada na carbonatação dos painéis; (b) corpos de prova dispostos dentro da câmara de carbonatação.

2.2.5 Avaliação das propriedades físicas

Os ensaios físicos aconteceram após um tempo de cura igual a 28 dias. Os ensaios e respectivas normas adotadas para a avaliação física das amostras estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios normativos para análise das propriedades físicas dos painéis.

Ensaios	Nº de CP/ tratamento	Dimensões CP's (cm)	Normas
AA2h (%)	6	10 x 10 x 1,5	ASTM D-1037 (2012)**
AA24h (%)	6	10 x 10 x 1,5	
IE2h (%)	6	10 x 10 x 1,5	
IE24h (%)	6	10 x 10 x 1,5	
Densidade (g/cm³)	10	5 x 5 x 1,5	NBR 14810-3 (2011)

Fonte: Da autora (2024).

Nota: AA2h = absorção de água após 2h de imersão; AA24h = absorção de água após 24h de imersão; IE2h = inchamento em espessura após 2h de imersão; IE24h = inchamento em espessura após 24h de imersão; CP = corpo de prova; **modificação das dimensões da amostra em referência a norma.

2.2.6 Avaliação das propriedades mecânicas

2.2.6.1 Módulo de elasticidade (MOE) e Módulo de ruptura (MOR)

O ensaio de flexão estática seguiu as condições estabelecidas na ASTM D-1037 (2012). Foram ensaiados um total de 9 amostras para cada tipo de tratamento, com dimensões iguais a 250 x 50 x 1,5 mm (comprimento x largura x espessura). O teste de flexão em três pontos, com espaçamento entre os apoios de 200mm, foi utilizado para determinar o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), de acordo com as equações 3 e 4.

$$MOE = \frac{L^3(F2-F1)}{4tb^3(a2-a1)} \quad [3]$$

Em que:

MOE- módulo de elasticidade, em MPa;

L- Comprimento do vão, em mm;

F1 e F2- são cargas, em N.

t- Espessura da amostra, em mm;

b- largura da amostra, em mm;

a1 e a2- deflexões no comprimento médio das amostras.

$$MOR = \frac{3F_{max}L}{2tb^2} \quad [4]$$

Em que:

MOR- módulo de ruptura, em MPa;

F_{máx}- carga máxima de ruptura atingida no ensaio, em N;

L- Comprimento do vão, em mm;

t- Espessura da amostra, em mm;

b- largura da amostra, em mm;

2.2.6.2 Ligação Interna (LI)

O ensaio de ligação interna seguiu as condições estabelecidas na ASTM D-1037 (2012). Foram ensaiadas 12 amostras para cada tipo de tratamento, com dimensões iguais a 5 x 5 x 1,5 mm (comprimento x largura x espessura). A resistência da ligação interna foi calculada a partir da fórmula da equação 5.

$$LI = \frac{F_{max}}{A} \quad [5]$$

Em que:

LI- resistência de ligação interna, em MPa;

F_{máx}- carga máxima de ruptura atingida no ensaio, em N;

A- área da seção transversal, em mm²;

2.2.6.3 Resistência a compressão (CP)

O ensaio de compressão seguiu as condições estabelecidas na ASTM D-1037 (2012). Foram ensaiadas 12 amostras para cada tipo de tratamento, com dimensões iguais a 25 x 10 x 1,5 mm (comprimento x largura x espessura). A resistência à compressão foi calculada a partir da fórmula da equação 6.

$$CP = \frac{F_{max}}{A} \quad [6]$$

Em que:

CP- Resistência à compressão, em MPa;

F_{máx}- carga máxima de ruptura atingida no ensaio, em N;

A- área da seção transversal, em mm²;

2.2.7 Condutividade térmica

Para determinar a condutividade térmica do material, foram retirados três corpos de prova com dimensões iguais a 25 x 10 x 1,5 cm (comprimento x largura x espessura) dos painéis de cada tratamento. Os corpos de prova foram ensaiados em equipamento desenvolvido no complexo BIOMAT – DCF/UFLA.

O ensaio de análise térmica foi realizado com auxílio de uma câmara produzida com caixas de poliestireno, de modo a isolar a temperatura interna.

No interior da câmara, em sua parte inferior, foi instalada uma fonte de calor (lâmpada incandescente) conectada a um termostato que manteve a temperatura em 60°C, onde a amostra permaneceu em média por 2 h. A cada 15 minutos, foi realizada a leitura das temperaturas na parte inferior e superior do equipamento, até alcançar a temperatura constante, momento em que o ensaio foi encerrado.

Na parte superior e inferior da câmara, entre as amostras, foram inseridos dois termopares, responsáveis por realizar as leituras de temperatura durante o ensaio. A condutividade térmica do material foi calculada utilizando o gradiente de temperatura, obtido a partir das leituras realizadas nos termopares, o fluxo de calor e a espessura do material, de acordo com a equação 7.

$$K = \frac{q_k}{dT/dx} \quad [7]$$

Em que:

K- Condutividade térmica do material, em W/ (m.K);

q_k- fluxo de calor, em W/m²;

dT: gradiente de temperatura, em °C ou K;

dx- comprimento que atravessa o fluxo de calor, em metros (m);

2.2.8 Análise Microestrutural

As características microestruturais dos painéis foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada no Departamento de Fitopatologia da UFLA. Os ensaios foram conduzidos em um equipamento da marca ZEISS, modelo DMS 940. As amostras foram retiradas da superfície de ruptura das placas que foram ensaiadas por flexão estática.

Micrografias foram realizadas nos corpos de prova ensaiados à flexão, por meio de microscópio óptico de luz composto Leica DM4000B (LM), acoplado a uma câmera digital Moticam X – Motic Europe CMOS, com aumento de 100x.

Para quantificar os elementos químicos presentes nas amostras de cada tratamento, foi realizada MEV com análise EDS, utilizando o equipamento FEG-UHR Clara Tescan, com detector de raio-x, X-Flash6-60 Bruker (MEV/EDS), pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da UFLA.

2.2.9 Análise termogravimétrica (TG)

As amostras de diferentes tipos de painéis (carbonatados e não carbonatados) foram imersas em álcool isopropílico durante quinze minutos, conforme recomendações descritas por Snellings *et al.* (2018, p. 3). Posteriormente, foram secas em estufa a 70 °C por 24 h e mantidas em sacos plásticos selados até os testes de caracterização.

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em um equipamento Netzsch, com sistema de análise simultânea STA 409, utilizando uma corrente dinâmica de nitrogênio (vazão = 60 ml/min) e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, até a temperatura máxima de 1000°C.

2.2.10 Análise Estatística

Os dados do experimento foram avaliados considerando o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2. Os resultados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e, quando significativos, foram realizadas análises de regressão linear. O teste de média Scott Knott, ao nível de 5% de significância, foi aplicado para diferenciação dos tratamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização da madeira

As características químicas, físicas e anatômicas das partículas de pinus são apresentadas na Tabela 5. Para a caracterização química, foi utilizado o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh.

A presença de extrativos é um dos fatores que mais afeta a reação de hidratação do cimento (HACHMI; MOSLEMI, 1989). O valor encontrado para este componente foi relativamente baixo e próximo ao encontrado em outros estudos que avaliaram a composição química da madeira de *Pinus oocarpa*.

Vilarruel *et al.* (2023, p. 1755), ao avaliar a influência de resíduos de trigo em painéis aglomerados de madeira de *Pinus oocarpa*, encontraram valores para os teores de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose iguais a 6,18%, 29,28%, 1,25% e 63,29%, respectivamente.

Bufalino *et al.* (2023, p. 6), ao comparar as propriedades de painéis de cimento e madeira de *Pinus oocarpa* com painéis produzidos com cimento e madeira de folhosas amazônicas, encontraram valores iguais a aproximadamente 5% para o total de extrativos, 0,20% para o teor de cinzas e 31% para o teor de lignina para a madeira de pinus.

Tabela 5 - Caracterização das partículas de *Pinus oocarpa*.

Caracterização do material	Resultados	Metodologia
Cinzas (%)	0,52±0,05%	NBR 7989 (2010)
Extrativos (%)	5,92±0,32%	NBR 14853 (2010)
Lignina (%)	31,96±0,55%	NBR 13999 (2003)
Holocelulose (%)	83,45±0,11%	Browning (1969)
Celulose (%)	73,41±0,65%	Kennedy, Phillips e Williams (1987)
Hemicelulose (%)	10,04%±0,56%	Diferença entre a holocelulose e a celulose
Densidade básica (g/cm³)	0,32±0,03	NBR 11941 (2003)
Comprimento (mm)	3,56±0,38	
Largura (µm)	46,22±5,14	Coradin e Muniz (1991) e IAWA COMMITTEE (1989)
Espessura da parede (µm)	12,74±1,33	
Diâmetro do Lúmen (µm)	24,59±4,15	
Coefficiente de Flexibilidade (%)	77,02	

Fonte: Da autora (2024).

3.2. Caracterização do RMF

As Tabelas 6 e 7 apresentam dados sobre a caracterização química do RMF.

Tabela 6- Caracterização químicas do rejeito de minério de ferro.

PROPRIEDADES	RESULTADOS
pH	7,20
K (mg/dm³)	83,28
P (mg/dm³)	8,62
Na (mg/dm³)	0,00
Ca (cmolc/dm³)	2,22
Mg (cmolc/dm³)	0,27
Al (cmolc/dm³)	0,00
H+Al (cmolc/dm³)	0,50
SB (cmolc/dm³)	2,70
t (cmolc/dm³)	2,70
CTC (T) (cmolc/dm³)	3,20
V (%)	84,49
m (%)	0,00
M.O (dag/kg)	0,88
P-Rem (mg/L)	36,80
Zn (mg/dm³)	1,50
Fe (mg/dm³)	105,50
Mn (mg/dm³)	76,70
Cu (mg/dm³)	1,41
B (mg/dm³)	0,01
S (mg/dm³)	41,80

Fonte: Da autora (2024).

Nota: pH em água; KCl e CaCl₂ - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator: SMP. SB = Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) = Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T) = Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V = Índice de Saturação de Bases; m = Índice de Saturação de Alumínio; MO = Matéria Orgânica (Oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N+ H₂SO₄ 10N; P-rem = Fósforo Remanescente; Zn = zinco; Fe = ferro; Mn = manganês; Cu = cobre; B = extrator água quente; S = extrator fosfato monocálcio em ácido acético.

Tabela 7 - Compostos químicos presentes na amostra.

COMPOSTO QUÍMICO	PERCENTUAL (%)
Fe	16,322
SiO₂	24,150
Al₂O₃	4,332
MgO	0,533
K₂O	0,375

Fonte: Da autora (2024).

Nota: Fe=Ferro; SiO₂=Dióxido de silício; Al₂O₃=Óxido de alumínio; MgO=óxido de magnésio; K₂O=óxido de potássio.

Pelos dados da Tabela 7, observa-se que os elementos químicos mais abundantes na amostra foram o ferro, o dióxido de silício e o óxido de alumínio, seguidos por pequenas porcentagens de óxido de magnésio e óxido de potássio.

A Tabela 8 apresenta o resultado da análise granulométrica do RMF. O material foi classificado como solo de textura média, com maior quantidade de silte e argila. De acordo com a classificação granulométrica, cerca de 70% do material é constituído por partículas com diâmetros inferiores a 50µm, segundo classificação da EMBRAPA (TEXEIRA *et al.*, 2017, p. 95).

Tabela 8 -Análise granulométrica do rejeito de minério de ferro.

CARACTERÍSTICAS DO RMF	RESULTADOS
Argila (%)	20
Silte (%)	50
Areia (%)	30
Classificação do solo	Solo Tipo 2 - Textura média
Massa específica (g/cm³)	3,080

Fonte: Da autora (2024).

Nota: Solo Tipo 2=Textura Média. Metodologia de análise de acordo com EMBRAPA (TEIXEIRA, *et al.*, 2017).

A Tabela 9 apresenta a comparação dos resultados encontrados neste estudo com os resultados encontrados na literatura, obtidos por outras pesquisas que também caracterizaram o RMF.

Tabela 9- Comparação entre os resultados encontrados no presente trabalho e resultados encontrados na literatura, para a composição química e física do RMF.

Componente	Resultados próprios	Literatura		
		Fontes <i>et al.</i> (2016, p. 990)	Wagmacker (2019, p. 65)	Vilela <i>et al.</i> (2020, p. 2)
Fe (%)	16,32	-	-	14,52
SiO ₂ (%)	24,1	24,9	54,7	84,79
Fe ₂ O ₃ (%)	-	45,9	39,1	
Al ₂ O ₃ (%)	4,33	4,82	3,30	0,21
MgO (%)	0,5	-	0,1	
K ₂ O (%)	0,4	-	0,2	
Argila (%)	20	<50	<61	52
Silte (%)	50	-		16
Areia Grossa (%)	9	-		
Areia Fina (%)	43	-		32
Massa específica (g/cm ³)	3,08	3,88	3,06	-

Fonte: Da autora (2024).

Nota: Fe = Ferro; SiO₂ = Dióxido de silício; Fe₂O₃ = óxido de ferro; Al₂O₃ = Óxido de alumínio; MgO = óxido de magnésio; K₂O = óxido de potássio.

Observa-se que, apesar de todos os autores terem trabalhado com RMF, a composição química, principalmente em relação aos teores de sílica e ferro, e a composição granulométrica são muito variáveis.

A variação nas características químicas e mineralógicas dos rejeitos está diretamente relacionada ao método de processamento mineral empregado, ao tipo de minério beneficiado, às variações nas frentes de mineração e aos produtos químicos utilizados no processo (D'AGOSTINO, 2008, p. 93).

O RMF utilizado no presente estudo foi recolhido após o rompimento da barragem e deposição no meio ambiente, tornando-o suscetível à ação de intempéries. Portanto, uma das hipóteses é que tenha ocorrido a lixiviação das partículas mais finas, e esse fator poderia explicar a menor quantidade de argila presente no material.

Os resultados obtidos foram mais próximos aos resultados encontrados por Fontes *et al.* (2016, p. 990), que utilizou RMF para produzir argamassas voltadas ao assentamento e revestimento de tijolos.

Com relação à composição química, a presença dos óxidos de silício (SiO_2), de óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) são fatores importantes para garantir o comportamento pozolânico do material, uma vez que esses componentes reagem com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando compostos com propriedades aglomerantes.

De acordo com a NBR 12653 (2014), o somatório desses componentes, para que o material seja considerado com capacidade pozolânica, não deve ser inferior a 50%. No presente estudo, o valor encontrado situa-se em 28,48% ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$). Embora esse resultado esteja bem próximo ao alcançado por Fontes *et al.* (2016, p. 990), ele ainda está abaixo do mínimo exigido pela norma brasileira.

3.3 Atividade Pozolânica

A Tabela 10 apresenta os resultados encontrados na análise de atividade pozolânica. Observa-se que, para ambos os ensaios, a amostra não alcançou o valor de referência mínimo da NBR 12653 (ABNT, 2014) para ser considerada uma pozolana.

Tabela 10- Resultados dos ensaios para análise da atividade pozolânica da amostra.

ENSAIO	REFERÊNCIA NORMATIVA	RESULTADO ENCONTRADO
Índice de Desempenho	75%	57,83%
Material Pozolânico (NBR 5752; 2014).		
Índice de Atividade Pozolânica (Método Chapelle Modificado) (NBR 15895; 2010).	436 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ RAVERDY <i>et al.</i> (1980)	287,27mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$

Fonte: Da autora (2024).

Nota: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = hidróxido de cálcio.

Este resultado pode estar associado ao baixo teor de sílica e óxido de alumínio presentes na amostra. Embora os resultados encontrados não tenham sido favoráveis para classificar o RMF como pozolana, sua aplicação em matrizes cimentícias ainda é viável, visto que os resultados encontrados na literatura indicam que esse tipo de material possui uma boa interação com o cimento.

3.4 Propriedades físicas dos painéis cimento-madeira

Os resultados da análise de variância para as propriedades físicas dos painéis de cimento-madeira encontram-se discriminados na Tabela 11.

Tabela 11- ANOVA dos resultados das propriedades físicas.

FV	Fc (densidade)	Fc (IE 2h)	Fc (IE 24h)	Fc (AA 2h)	Fc (AA 24h)
% de RMF	9,188 **	13,467**	3,988**	6,010**	0,480 ns
CA	0,088 ns	66,138**	6,819**	0,292 ns	4,958 **
% RMF x CA	2,059 ns	1,367 ns	0,340 ns	0,480 ns	0,385 ns

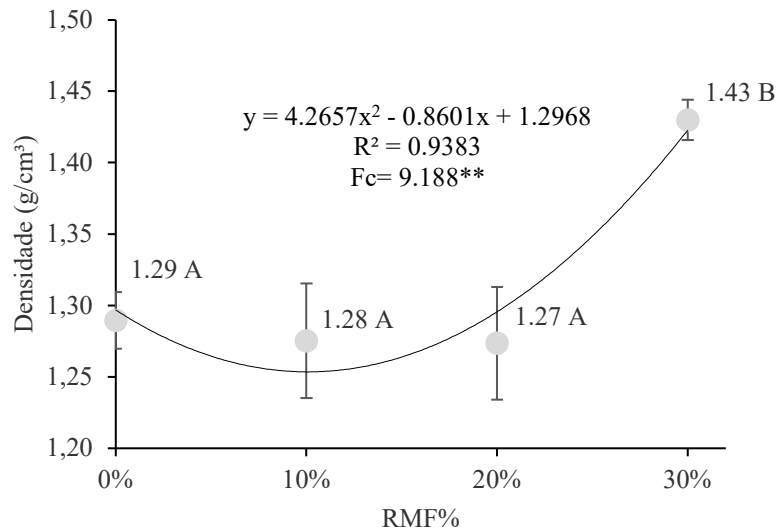
Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; CA =carbonatação acelerada; FV =Fonte de variação; Fc = distribuição F; IE 2h = inchamento em espessura, duas horas de imersão; IE 24h = inchamento em espessura, 24h de imersão; AA 2h = absorção de água 2h de imersão; AA 24h =absorção de água 24 horas de imersão; **p<0,05; ns = não significativo.

A ANOVA demonstrou que não houve interação significativa, ao nível de 5%, entre o percentual de RMF empregado no compósito e o tipo de cura adotado (com ou sem CA) para nenhuma das variáveis analisadas.

No entanto, para o tratamento com 30% de RMF, a densidade foi aproximadamente 12% maior em comparação aos demais tratamentos (p<0,05), conforme demonstrado na Figura 4. A influência da CA sobre essa propriedade não foi significativa, conforme disposto na Figura 5.

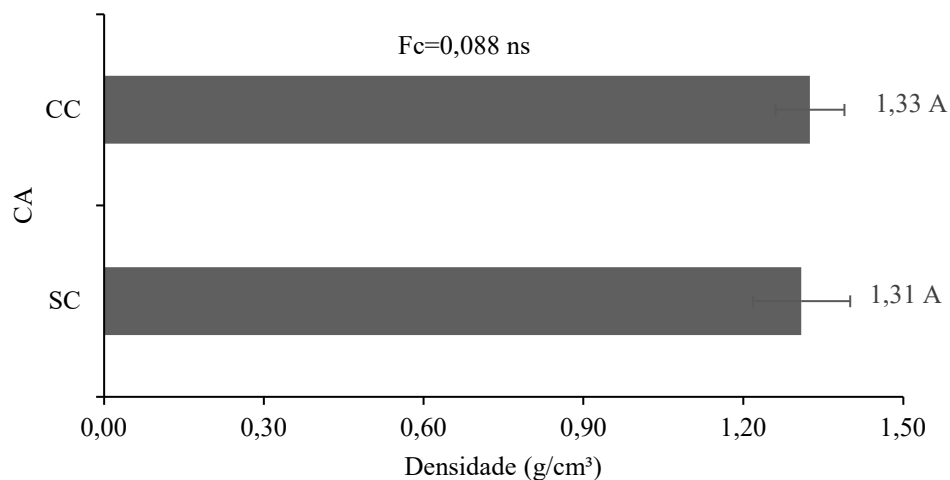
Figura 4 - Análise de regressão para a variável densidade, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, em g/cm³.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: **p<0,05; RMF = rejeito de minério de ferro.

Figura 5 - Resultado do teste de médias para a variável densidade, para os tratamentos com e sem CA.



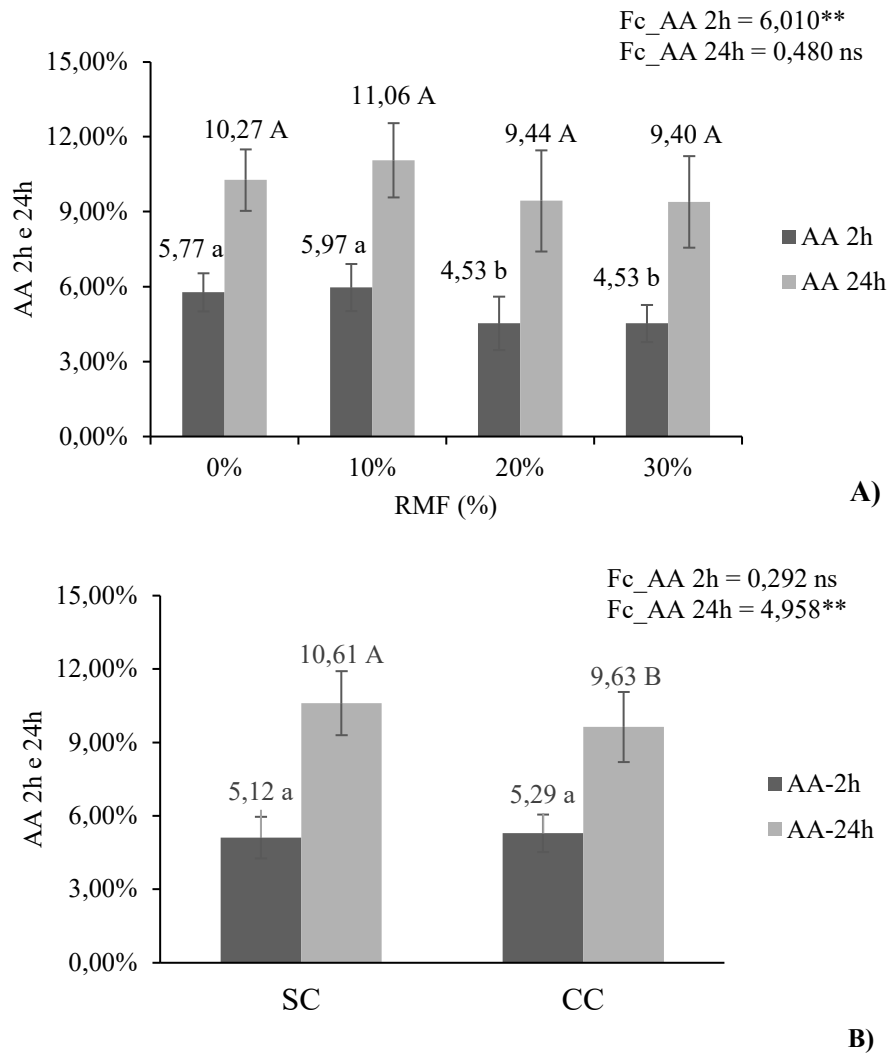
Fonte: Da autora (2024).

Nota: ns = não significativo; CA = carbonatação acelerada.

O processo Bison (BISON, 2017) estabelece que a densidade dos painéis de cimento-madeira deve ser de 1,25 g/cm³±10%. Já a norma EN 323 (CEN, 2007) determina o valor de 1,35±0,1g/cm³ para essa propriedade. Considerando as tolerâncias especificadas, os tratamentos contendo 0%, 10% e 20% de RMF atendem ambas as normas. No entanto, o tratamento com 30% de RMF se enquadra apenas na norma EN 323 (CEN, 2007).

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para a absorção de água em 2h e 24h.

Figura 6 – Absorção de água após 2 e 24 horas nos diferentes tratamentos, com e sem CA.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: ** $p < 0,05$; ns = não significativo; AA2h = absorção de água após 2h de imersão; AA24h = absorção de água após 24h de imersão; RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada. Valores médios seguidos pela mesma letra minúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância em relação ao %RMF. Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância em relação à utilização de CA.

Ao avaliar o gráfico da Figura 6A, observa-se que o percentual de RMF incorporado nos painéis influenciou significativamente a absorção de água 2h. Os painéis com 20% e 30% de RMF apresentaram menor absorção de água em comparação com aqueles contendo 0% e 10% ($p < 0,05$). Contudo, após 24 horas de imersão, não houve diferença estatística entre os tratamentos, conforme indicado pelo teste de médias ($p > 0,05$).

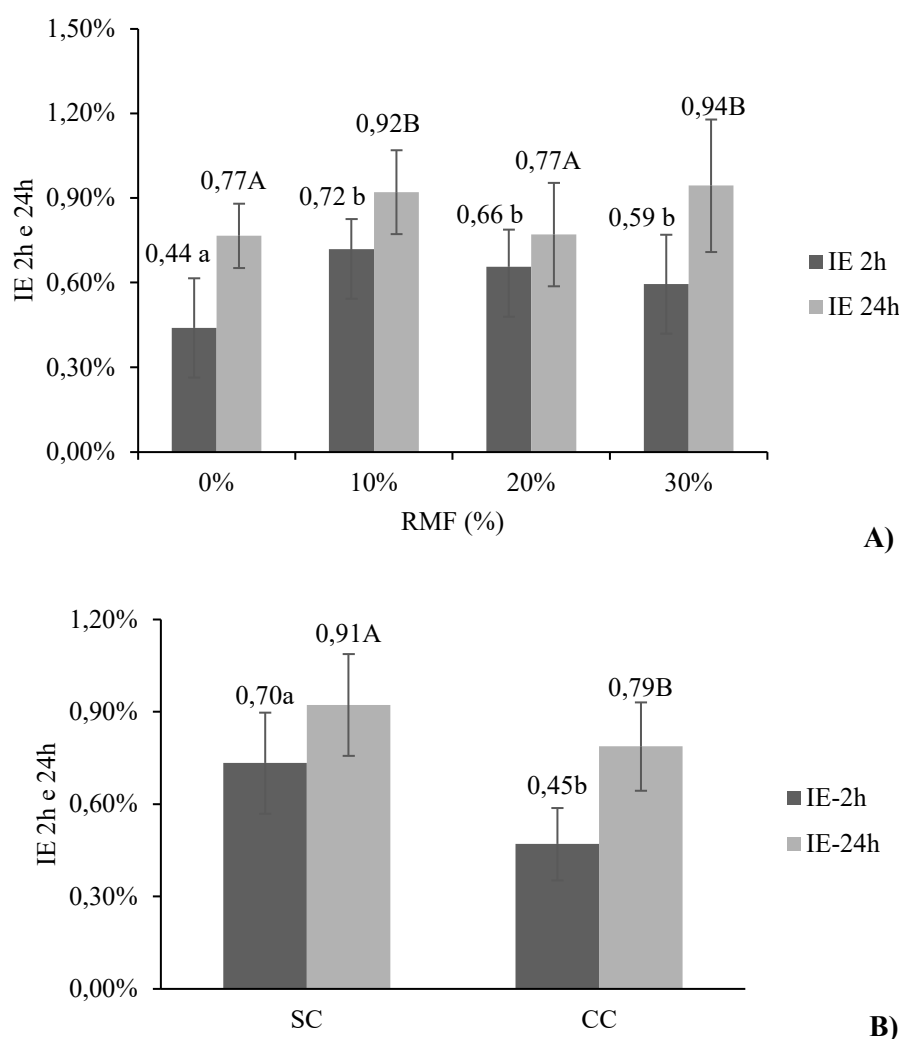
A redução na absorção de água nos painéis com maior percentual de RMF pode estar associada à presença de partículas finas de RMF, que preenchem os macro e micro poros da

matriz cimentícia. Esse preenchimento reduz a quantidade de vazios no material, diminuindo, consequentemente, a absorção de água (SHETTIMA *et al.*, 2016, p. 78).

A CA não apresentou um efeito significativo na absorção de água 2h. No entanto, após 24 horas, os painéis submetidos à carbonatação absorveram uma quantidade menor de água em comparação com os que não passaram pelo mesmo processo ($p < 0,05$).

A Figura 7 apresenta os dados obtidos para o inchamento em espessura (IE) após 2h e 24h, considerando o percentual de RMF empregado (Figura 7A) e o tipo de cura (Figura 7B).

Figura 7 - Inchamento em espessura 2h e 24h dos painéis de cimento-madeira.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: IE 2h = inchamento em espessura, duas horas de imersão; IE 24h = inchamento em espessura, 24h de imersão; RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada. Valores médios seguidos pela mesma letra minúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância em relação ao %RMF. Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância em relação à utilização de CA.

De acordo com os dados da Figura 7A, para o IE 2h, o menor valor observado ($p < 0,05$) foi no tratamento com 0% de RMF, enquanto os tratamentos com 10%, 20% e 30% de RMF apresentaram valores estatisticamente similares. Para o IE 24h, os percentuais de 0% e 20% de RMF obtiveram médias iguais e significativamente inferiores aos tratamentos com 10% e 30% ($p < 0,05$).

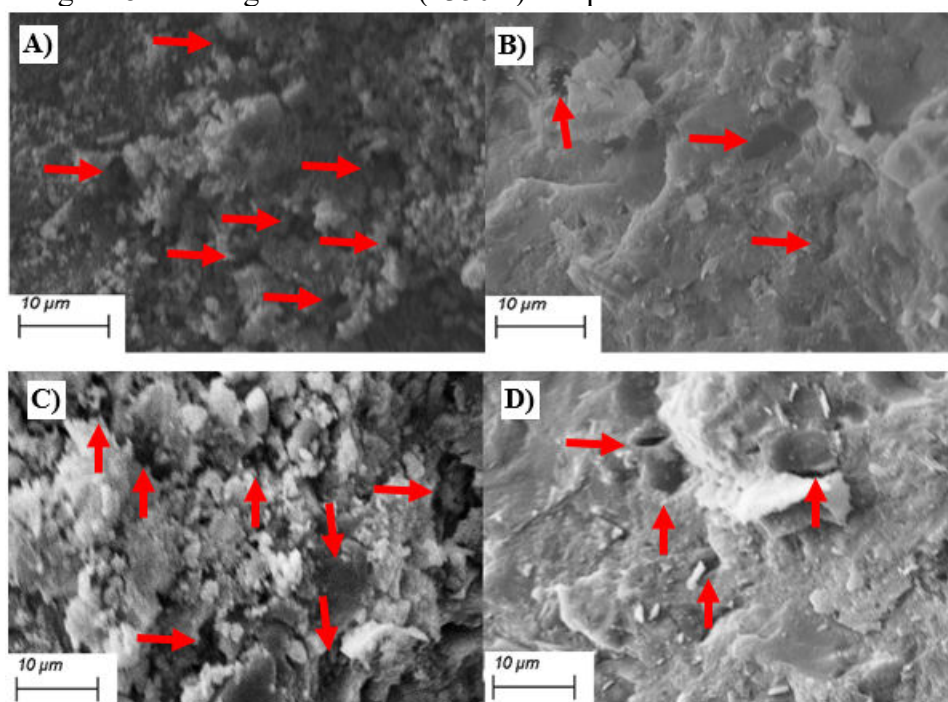
O processo Bison (BISON, 2017) estabelece valores máximos de 1% para o IE 2h e 1,5% para o IE 24h. Já a norma EN 634-2 (CEN, 2007) determina que o inchamento em espessura após 24h de imersão não deve ultrapassar 1,5%. Todos os valores encontrados para IE 2h e 24h ficaram abaixo desses limites, indicando que, para essa propriedade, os painéis produzidos atenderam aos requisitos comerciais.

A aplicação da CA reduziu significativamente os valores de IE 2h e 24h, conforme demonstrado na Figura 7B. Os painéis submetidos ao processo de CA apresentaram uma redução de aproximadamente 55% no IE 2h e 15% no IE 24h ($p < 0,05$). Esse mesmo comportamento foi relatado por Cabral et al. (2018, p. 52), ao avaliar o efeito da CA em painéis de cimento-madeira produzidos com partículas de madeira balsa.

A redução nos valores de absorção de água e IE após a CA pode ser atribuída ao aumento na formação de CaCO_3 , resultante do CO_2 com o Ca(OH)_2 . O CaCO_3 , sendo um material sólido insolúvel em água, se deposita nos poros e microfissuras da matriz, reduzindo sua porosidade. Como consequência, o compósito se torna mais denso e menos propenso a absorção de água (ZHANG; GHOULEH; SHAO, 2017, p. 126).

As micrografias apresentadas na Figura 8 confirmam essa observação. Nota-se uma maior quantidade de vazios nas amostras não carbonatadas (Figuras 8A e 8C), enquanto as amostras submetidas à CA exibem uma matriz mais uniforme e compacta (Figuras 8B e 8D).

Figura 8 - Micrografias MEV (2350X) dos painéis de cimento-madeira.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada. A = 0% RMF-SC; B = 0% RMF-CC; C = 30% RMF-SC; D = 30% RMF-CC. As setas vermelhas indicam a presença de poros na matriz.

3.5 Condutividade Térmica

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise de variância para a propriedade de condutividade térmica dos painéis de cimento-madeira.

Tabela 12- ANOVA dos resultados para a propriedade de condutividade térmica.

FV	Fc
% de RMF	3,221 ns
CA	1,673 ns
% RMF x CA	1,491 ns

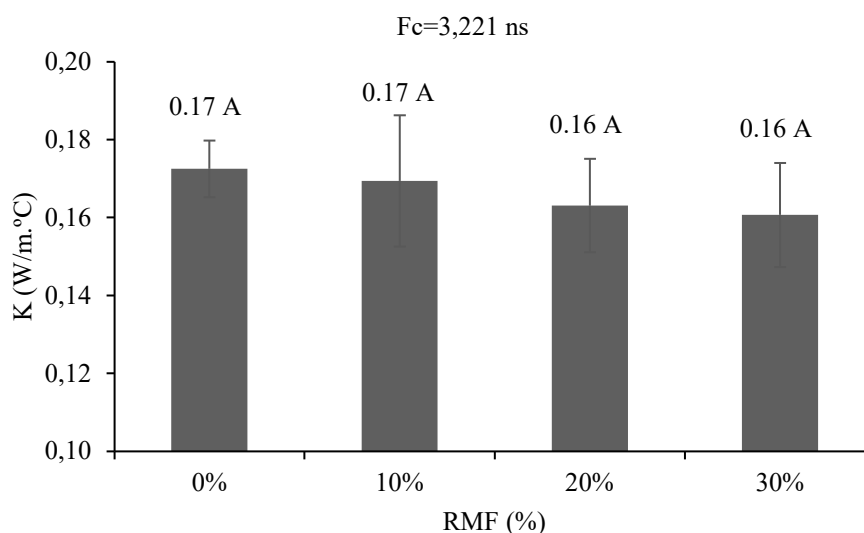
Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; ns = não significativo; FV=fonte de variação; F=distribuição F.

Os resultados apresentados na Tabela 12 indicam que tanto o percentual de RMF quanto o tipo de cura adotado não influenciaram significativamente a condutividade térmica dos

painéis de cimento-madeira. Conforme ilustrado na Figura 9, as médias encontradas para essa propriedade foram iguais em todos os tratamentos.

Figura 9 - Condutividade térmica dos painéis, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, em W/m. °C.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; K = condutividade térmica; $**p<0,05$; valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação ao % RMF.

Os valores de condutividade térmica encontrados nos painéis de cimento-madeira foram menores que o limite estabelecido pela norma EN 12664 (CEN, 2004) e recomendado por Bison (BISON, 2017), que é igual a 0,22W/m.°C. Este resultado é considerado positivo, pois uma condutividade térmica mais baixa indica que o material possui melhores propriedades isolantes. Isso significa que os painéis possuem um desempenho térmico melhor, proporcionando um ambiente mais confortável, com temperatura mais controlada, o que é uma característica desejável em aplicações de construção civil e construções sustentáveis.

3.6 Propriedades mecânicas dos painéis de cimento-madeira

A caracterização mecânica dos painéis de cimento-madeira foi efetuada por meio da realização dos ensaios de resistência à flexão estática (MOE e MOR), compressão paralela à superfície do painel e ligação interna.

Os resultados da ANOVA para as propriedades mecânicas dos painéis de cimento-madeira estão descritos na Tabela 13. Observa-se que o percentual de RMF inserido em

substituição parcial do cimento e a utilização da cura por CA foram significativos em todos os tratamentos ($p < 0,05$). Somente para a propriedade de ligação interna, a interação entre o percentual de RMF e a cura por CA não foi significativa.

Tabela 13- ANOVA dos resultados das propriedades mecânicas.

FV	Fc (MOR)	Fc (MOE)	Fc (CP)	Fc (LI)
% de RMF	42,451 **	33,469**	42,816**	70,328**
CA	39,577 **	9,262**	30,462**	138,262**
% RMF x CA	19,372 **	6,081**	10,262**	2,566 ns

Fonte: Da autora (2024).

Nota: MOE = módulo de elasticidade; MOR = módulo de ruptura; CP = resistência à compressão; LI = ligação interna; FV = fonte de variação; Fc = distribuição F.

** $p < 0,05$ =significativo a 5%; ns = não significativo.

3.6.1 MOE e MOR

Nas Tabelas 14 e 15 são apresentados os valores encontrados para o MOE e MOR, de acordo com o percentual de RMF empregado e o tipo de cura, com e sem CA.

Tabela 14- Valores médios com seus respectivos desvios padrão para o MOE, em MPa.

CA/ RMF	MOE			
	0%	10%	20%	30%
SC	3161,26± 201,81 Aa	2215,74± 78,79 Ba	2600,63± 492,05 Ba	3746,44± 442,64 Aa
CC	3340,79± 631,97 Aa	2070,26± 171,26 Ba	3131,78± 149,89 Aa	5373,69± 987,24 Cb

Fonte: Da autora (2024).

Nota: MOE = módulo de elasticidade; RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; SC = sem carbonatação; CC = com carbonatação. Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação ao % RMF. Valores médios seguidos pela mesma letra minúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação à utilização de CA.

Tabela 15: Valores médios com seus respectivos desvios padrão para o MOR, em MPa.

CA/ RMF	MOR			
	0%	10%	20%	30%
SC	7,95± 1,29Aa	4,90± 1,01Ba	7,17± 1,10Aa	8,24± 0,54Aa
CC	8,45± 1,34Aa	6,76± 1,00 Bb	7,83± 0,48Aa	14,26± 0,98Cb

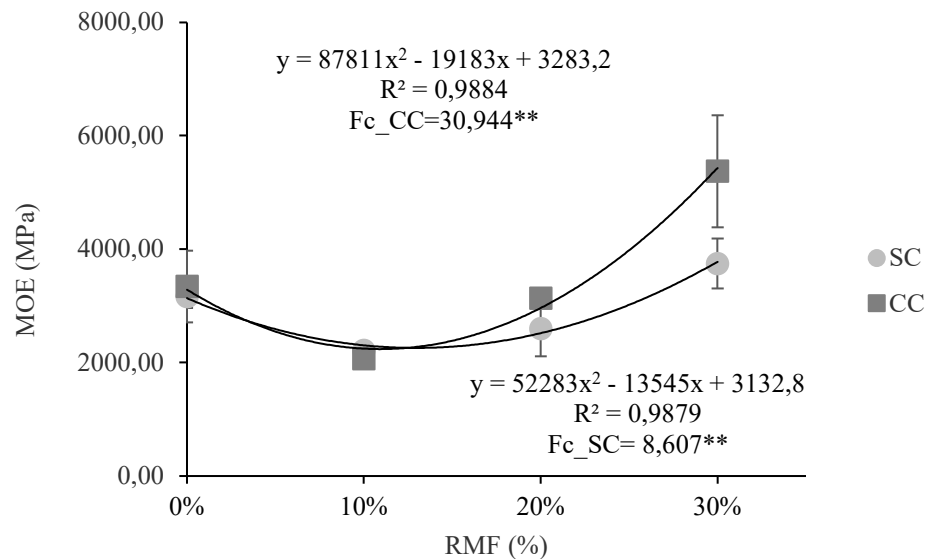
Fonte: Da autora (2024).

Nota: MOR = módulo de ruptura; RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; SC = sem carbonatação; CC = com carbonatação. Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação ao % RMF. Valores médios

seguidos pela mesma letra minúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação à utilização de CA.

As Figuras 10 e 11 apresentam a análise de regressão linear para as variáveis MOE e MOR, em função do percentual de RMF e do tipo de cura empregados.

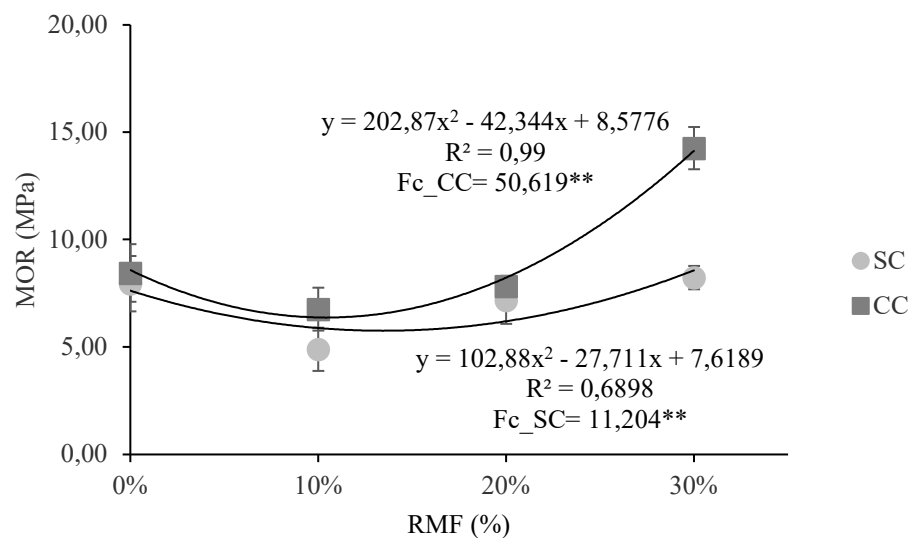
Figura 10 - Análise de regressão linear para a variável MOE, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, para os tratamentos com e sem CA, em MPa.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: MOE = módulo de elasticidade; RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; SC = sem carbonatação; CC = com carbonatação; $^{**}p < 0,05$.

Figura 11 - Análise de regressão linear para a variável MOR, nos diferentes níveis de substituição de cimento por IOT, para os tratamentos com e sem CA, em MPa.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: MOR = módulo de ruptura; RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; SC = sem carbonatação; CC = com carbonatação; ** $p < 0,05$.

De acordo com os dados das Tabelas 14 e 15 e das Figuras 10 e 11, a interação entre o percentual de RMF e a cura por CA provocou diferenças significativas nos resultados encontrados para o MOE e o MOR. Em relação ao MOE, os percentuais de RMF de 0% e 30% para os painéis não carbonatados apresentaram médias iguais, e foram consideravelmente maiores que os tratamentos com 10% e 20% ($p < 0,05$), sendo que estes últimos apresentando médias iguais entre si.

Para os painéis carbonatados, os tratamentos com 0% e 20% apresentaram médias iguais, e o melhor e o pior resultado foram observados para os tratamentos com 30% e 10% de RMF, respectivamente, com esses tratamentos divergindo de forma significativa dos demais e entre si ($p < 0,05$).

A cura por CA provocou um aumento significativo no valor do MOE apenas para o tratamento com 30% de RMF, sendo que a cura realizada por meio de CA propiciou um acréscimo no valor do MOE de aproximadamente 30%.

O processo Bison (BISON, 2017) determina um valor mínimo de 3000MPa para o MOE, enquanto a norma EN 634-2 (CEN, 2007) estabelece que os painéis de cimento-madeira não devem apresentar valor inferior a 4500MPa para painéis da classe 1 e 4000MPa para painéis classe 2.

Os painéis produzidos neste estudo apresentaram uma faixa de variação de MOE entre 2070,26 MPa e 5373,69 MPa. O tratamento contendo 10% de RMF não atendeu a nenhuma das especificações, tanto para os painéis carbonatados quanto para os não carbonatados. Os tratamentos com 0%, 20% após CA e 30% de RMF apresentaram valores acima das recomendações do Bison (BISON, 2017), com destaque para o tratamento com 30% de RMF que passou pelo processo de CA, o qual apresentou valor superior à recomendação da norma EN 634-2 (CEN, 2007) para painéis classe 1.

Para o tratamento constituído de 20% de RMF em substituição parcial ao cimento, o efeito da CA ocasionou um acréscimo na resistência do material, com o valor de MOE subindo de 2600,63 MPa para 3131,78 MPa, alcançando, assim, a recomendação comercial estabelecida por Bison (BISON, 2017).

Em relação ao MOR, para os painéis não carbonatados, apenas o tratamento com 10% de RMF exibiu um resultado significativamente inferior aos demais. Para os painéis carbonatados, os tratamentos com 0% e 20% resultaram em valores estatisticamente iguais, o

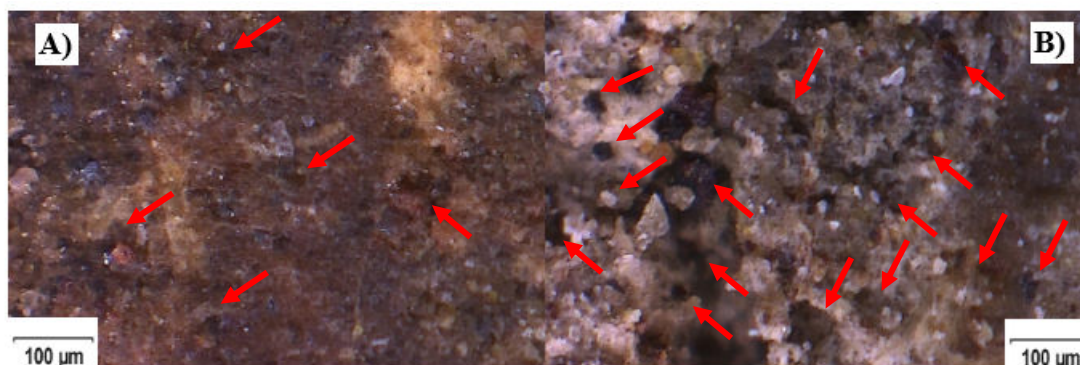
melhor e o pior desempenho foram apresentados pelos painéis contendo 30% e 10% de RMF, respectivamente, observando-se a mesma tendência de comportamento encontrada para o MOE.

A tendência de redução na resistência dos painéis, a partir do aumento no percentual de RMF, já era esperada, pois, de acordo com a Tabela 9, os ensaios realizados demonstraram que o RMF não atende aos requisitos mínimos para ser considerado um material pozolânico.

Entretanto, considerando apenas o efeito da variação no percentual de RMF, o tratamento contendo 30% apresentou valores médios similares ao tratamento controle para as propriedades de MOR e MOE. Esse resultado pode ser atribuído à maior densidade encontrada para os painéis contendo 30% de RMF (Figura 4).

Observa-se pela Figura 12 uma melhor compactação obtida para os painéis contendo 30% de RMF em comparação ao tratamento contendo 10% de RMF. Esses tratamentos exibiram, respectivamente, o melhor e o pior resultado para as propriedades de MOR e MOE.

Figura 12: Micrografias (100X) dos painéis de cimento-madeira contendo 30% e 10% de RMF.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação; A) 30% RMF-SC; B) 10% RMF-SC. As setas vermelhas indicam a presença de poros na matriz.

Ao comparar o efeito da CA no MOR, verifica-se um acréscimo significativo de resistência para os tratamentos contendo 10% e 30% de RMF ($p < 0,05$). A CA promoveu um aumento na resistência à flexão desses compósitos de aproximadamente 37% para o tratamento contendo 10% de RMF e 42% para o tratamento contendo 30% de RMF. Bison (BISON, 2017) e a norma EN 634-2 (CEN, 2007) definem um valor mínimo para o MOR igual a 9MPa; dessa forma, apenas o tratamento contendo 30% de RMF em que se efetuou a cura por CA, atingiu a recomendação comercial.

Alguns autores, ao pesquisarem a influência da CA em painéis de cimento-madeira, encontraram resultados para as propriedades de MOE e MOR relativamente maiores quando os painéis foram submetidos à cura por CA, no mesmo intervalo de tempo de 24 horas utilizado nesta pesquisa.

Cabral *et al.* (2018, p. 11) avaliaram a influência da CA em painéis de cimento e partículas de madeira balsa e relataram que os painéis carbonatados apresentaram um aumento de 23% no valor do MOR e 38% no valor do MOE.

Ali, Nars e Naje (2020, p 278) observaram um acréscimo de 134% no valor da resistência à flexão para painéis produzidos com cimento e serragem e submetidos a CA por um período de 24 horas. Os autores atribuíram esse resultado à melhoria provocada pela CA na interface entre a matriz de cimento e as partículas de serragem.

3.6.2 Compressão Paralela (CP)

A Tabela 16 informa os valores encontrados para a CP e respectivo teste de médias. A Figura 13 apresenta a análise de regressão linear para a variável CP em função do percentual de RMF e do tipo de cura adotado.

Pelos dados da Tabela 16 e Figura 13, nota-se que, para os painéis não carbonatados, ocorreu um decréscimo significativo na resistência para os percentuais de 10% e 20% de RMF. Em contrapartida, de acordo com teste de médias, o tratamento contendo 30% de RMF apresentou valor semelhante ao tratamento controle e foi significativamente maior que os demais ($p < 0,05$).

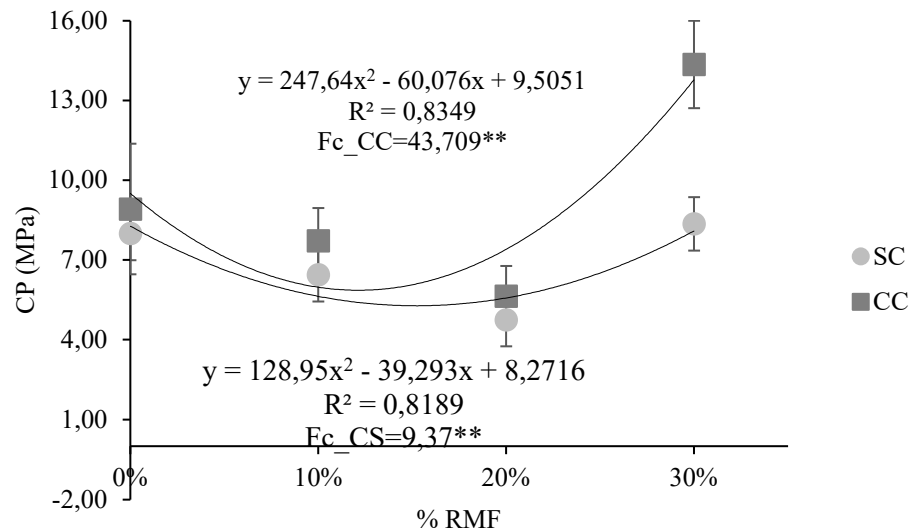
Tabela 16 - Valores médios com seus respectivos desvios padrão para a CP, em MPa.

CA/ RMF	CP			
	0%	10%	20%	30%
SC	8,0± 0,77 Aa	6,45± 0,33 Ba	4,76± 0,9 Ca	8,36±1,3 Aa
CC	8,92± 2,45 Aa	7,73±1,23 Aa	5,64± 1,14 Ba	14,36± 1,64 Cb

Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; CP = compressão paralela. Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação ao % RMF. Valores médios seguidos pela mesma letra minúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação à utilização de CA.

Figura 13 - Análise de regressão linear para a variável CP, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, para os tratamentos com e sem CA, em MPa.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada; CP = compressão paralela. $^{**}p < 0,05$.

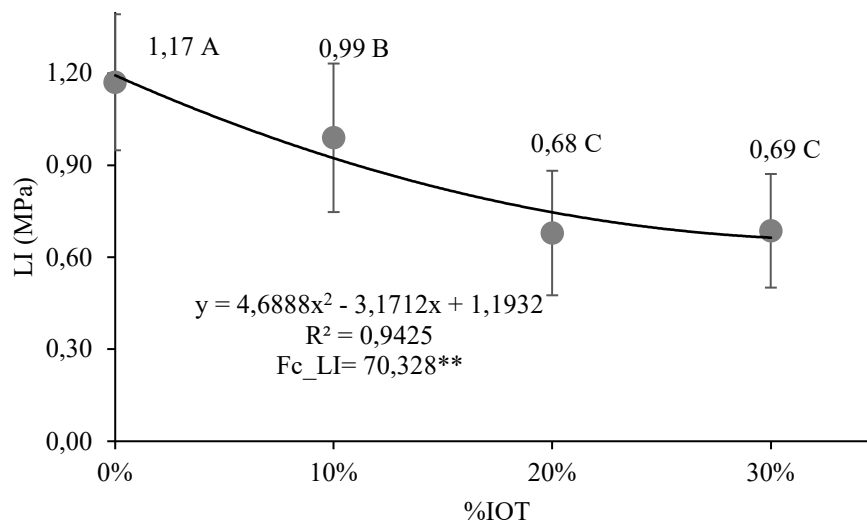
Para os painéis que passaram pelo processo de CA, a média obtida para o tratamento controle foi igual a média encontrada para o tratamento contendo 10% de RMF. O tratamento contendo 20% de RMF apresentou o menor valor de resistência, e o tratamento contendo 30% de RMF o melhor. Para ambos os tratamentos (20% e 30%), as médias encontradas divergiram de maneira significativa dos outros tratamentos analisados.

Com relação à utilização da cura por CA, os tratamentos contendo 20% e 30% de RMF apresentaram alterações significativas em relação ao tratamento sem carbonatação. O aumento na resistência à compressão foi da ordem de 19% para o tratamento contendo 20% de RMF, e de 71% para o tratamento contendo 30% de RMF. O processo Bison (BISON, 2017) e as demais especificações técnicas não determinam valores de referência para essa propriedade.

3.6.3 Ligação Interna (LI)

Os resultados encontrados para a propriedade de LI são apresentados na Figura 14. Não foi observado efeito significativo na interação entre o percentual de RMF e a cura por CA.

Figura 14- Análise de regressão linear para a variável LI, nos diferentes níveis de substituição de cimento por RMF, em MPa.



Fonte: Da autora (2024).

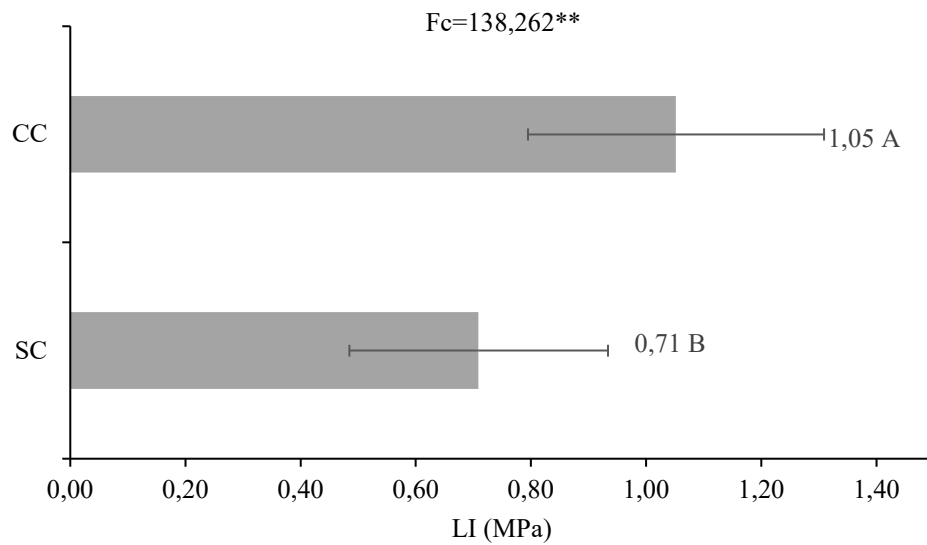
Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação; CC= com carbonatação; LI = ligação interna; $^{**}p < 0,05$. Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação ao % RMF.

Conforme Figura 14, o tratamento controle exibiu o maior valor de LI e divergiu de maneira significativa dos demais tratamentos ($p < 0,05$). Uma maior perda de resistência foi observada para os tratamentos com 20% e 30% de RMF.

Apesar dos painéis apresentarem uma tendência de redução na LI com o acréscimo de RMF, todos os tratamentos atingiram o valor mínimo de LI determinados no processo Bison (BISON, 2017) e na norma EN 634-2 (CEN, 2007). Bison (BISON, 2017) estabelece uma resistência mínima para LI igual a 0,40 MPa, enquanto para a norma EN 634-2 (CEN, 2007), esse valor corresponde a 0,50 MPa.

Conforme Figura 15, as amostras que passaram pela cura por CA apresentaram, em média, um aumento na resistência de aproximadamente 48%.

Figura 15: Médias de LI para os painéis de cimento-madeira com e sem CA.



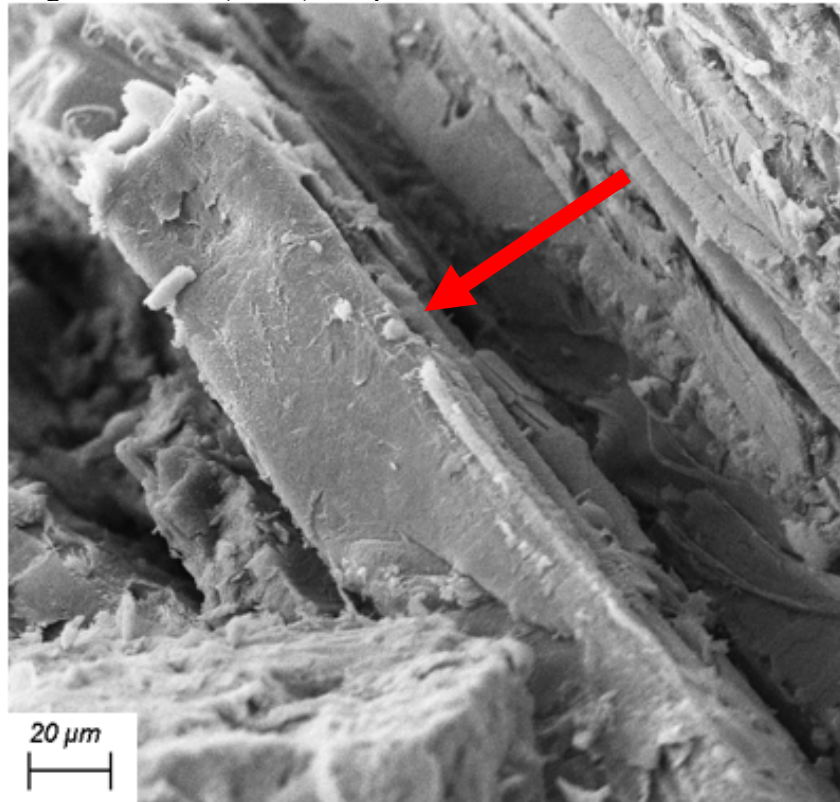
Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação; CC = com carbonatação; LI = ligação interna.

** $p < 0,05$ Valores médios seguidos pela mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância, em relação ao % RMF.

A quantidade de madeira inserida no painel, aliada a um efetivo recobrimento das partículas pela pasta de cimento, constitui fatores fundamentais para alcançar resultados favoráveis no teste de ligação interna (MENDES *et al.*, 2017; MOLESMI, 1987). Na imagem exibida na Figura 16, nota-se um adequado recobrimento das partículas, o que certamente influenciou os bons resultados alcançados para essa propriedade.

Figura 16: Micrografias MEV (750X) dos painéis de cimento-madeira 0% RMF carbonatado.



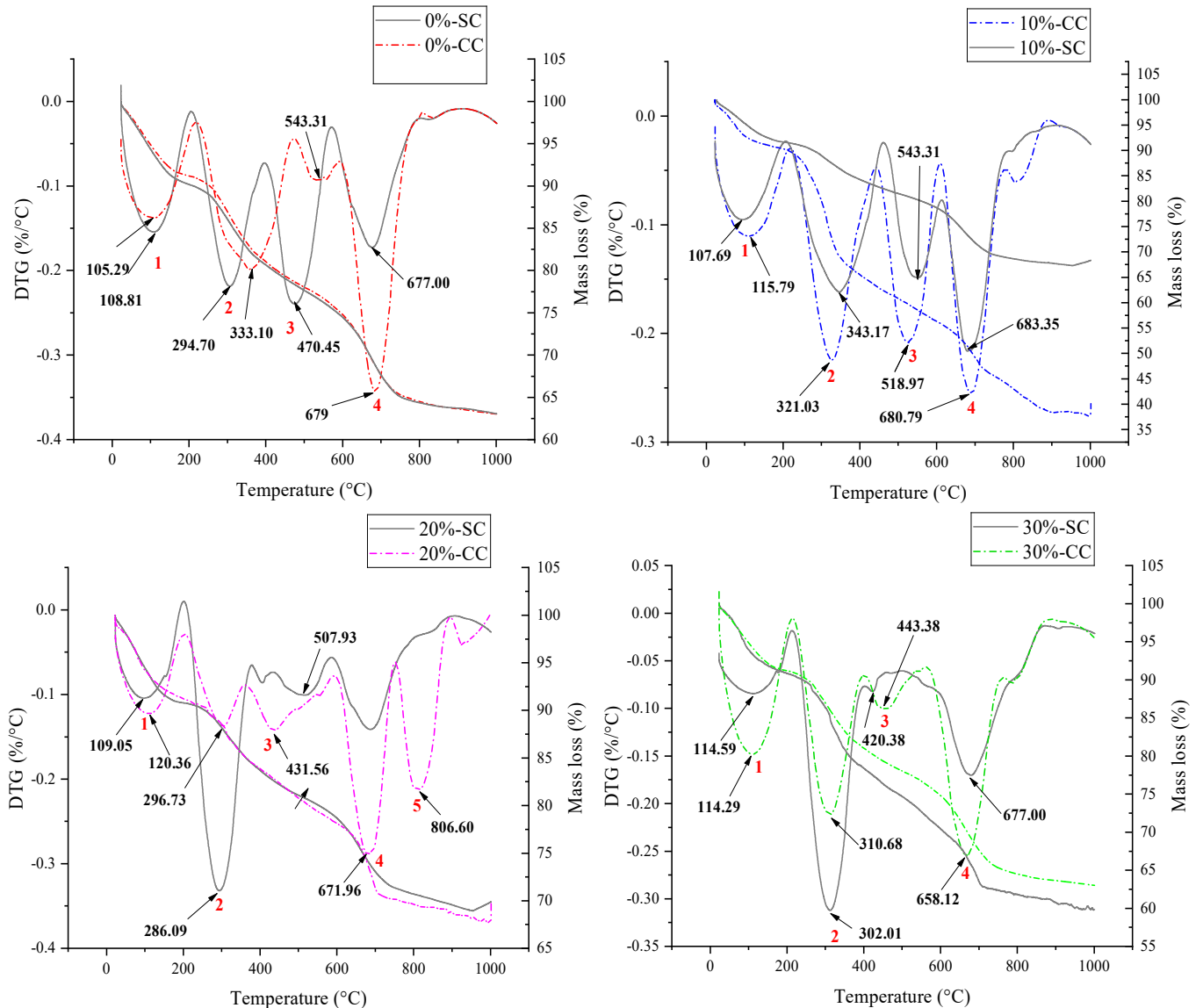
Fonte: Da autora (2024).

Nota: A seta vermelha indica fibra de madeira recoberta pela pasta de cimento.

3.7 Análise térmica por termogravimetria TGA e DTG

Na Figura 17 estão representadas as curvas obtidas na análise térmica TGA e sua derivada DTG para os painéis carbonatados e não carbonatados, confeccionados com diferentes percentuais de RMF.

Figura 17: TGA e DTG dos painéis, de acordo com %RMF e a cura por CA.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada; TGA = análise termogravimétrica; DTG = derivada da curva TGA.

A partir das curvas DTG, é possível detectar 4 picos principais para a maioria dos tratamentos. O primeiro pico, situado entre 50°C e 200°C, corresponde a desidratação do silicato de cálcio hidratado (CSH) e à decomposição da etringita (DWECK *et al.*, 2009; ROCHA *et al.*, 2014).

Observa-se pela Figura 17 que os painéis confeccionados com RMF, após passarem pelo processo de CA, obtiveram picos mais acentuados em comparação com os painéis que não

foram carbonatados. Essa condição foi observada com mais evidência para o tratamento contendo 30% de rejeito de minério.

Uma vez que o CSH é o principal produto de hidratação do cimento, responsável por conferir resistência mecânica ao compósito cimentício, o aumento na quantidade formada desse produto, após a carbonatação dos painéis com 30% de RMF, pode estar relacionada ao acréscimo significativo na resistência observado para esse tratamento nas propriedades de MOE, MOR, CP e LI.

Entre 200°C e 400°C ocorre a formação do segundo pico. Essa faixa de temperatura corresponde à degradação da celulose. A decomposição completa da celulose ocorre entre 300°C e 500°C (BIANCHI *et al.*, 2010, p. 397).

A acentuação desse pico para os tratamentos contendo RMF pode ser atribuída ao fato de que, no intervalo entre 150°C e 350°C, também ocorre a decomposição do hidróxido de ferro (KUSIN *et al.*, 2022, p. 22203).

O terceiro pico é associado a desidroxilação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e ocorre em uma faixa de temperatura entre 380°C e 550°C (KUSIN *et al.*, 2022, p. 22203).

Já o quarto pico compreende a decomposição do CaCO_3 e ocorre em uma faixa de temperatura entre 550°C e 1000°C (EL-HASSAN; SHAO, 2014; p.289).

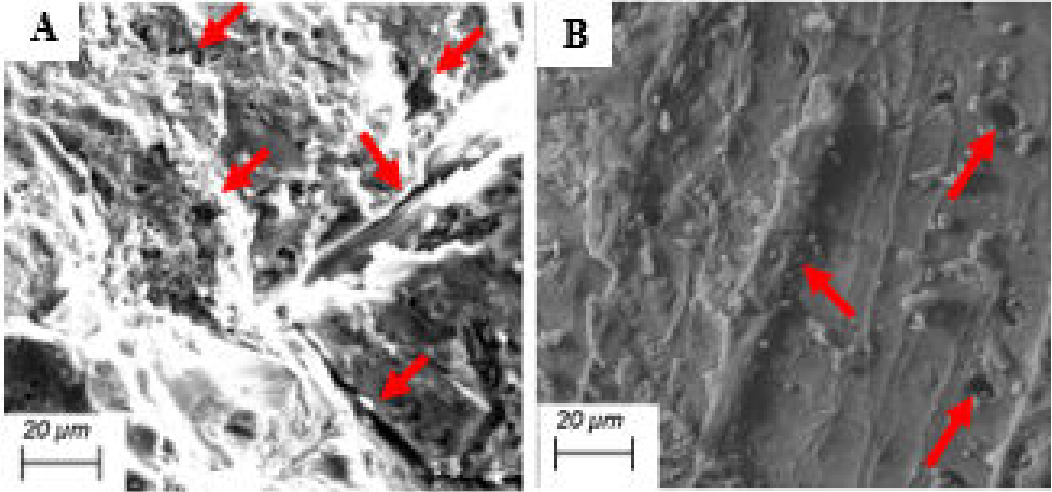
A amostra contendo 20% de RMF apresentou um quinto pico, após ser carbonatada, na faixa entre 780°C e 900°C. A decomposição do CaCO_3 acontece em dois estágios diferentes: entre 650°C e 780°C ocorre a decomposição do aragonita, um tipo de CaCO_3 termicamente menos estável, enquanto a calcita se decompõe no intervalo entre 780°C e 990°C (ROY *et al.*, 2021, p 16).

3.8 Análise morfológica e constituintes químicos - MEV-EDS

A Figura 18 apresenta a micrografia do tratamento contendo 30% de RMF, com e sem CA. Observa-se, pela indicação das setas vermelhas, que os painéis que passaram pelo processo de cura por CA apresentaram uma redução na quantidade de vazios e um menor destacamento das partículas de pinus, o que pode ser atribuído ao preenchimento dos vazios e zonas de transição reforço/matriz, provavelmente pela precipitação do CaCO_3 . Resultado similar foi observado por Pizzol *et al.* (2014, p. 103), ao verificar a formação de estruturas em camadas, possivelmente formadas por CaCO_3 .

A solidificação da microestrutura do compósito favorece suas propriedades mecânicas em comparação com o processo de cura convencional, fato que pode explicar o efeito positivo que a CA exerceu nas propriedades mecânicas dos painéis estudados (SHI, 2016; THIERY *et al.*, 2007).

Figura 18 - Micrografias MEV (2350X) dos painéis de cimento-madeira.



Fonte: Da autora (2024).

Nota: (A) 30% de RMF-SC; (B) 30% de RMF-CC; RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada; MEV = microscopia eletrônica de varredura.

Na Tabela 17 estão dispostas as quantidades de cálcio, sílica e alumínio presentes nas amostras dos painéis carbonatados e não carbonatados, obtidas por meio de análise EDS.

Tabela 17- Componentes químicos dos painéis, de acordo com o % de RMF e o tipo de cura, com e sem CA.

EQ	% RMF							
	0%		10%		20%		30%	
	SC	CC	SC	CC	SC	CC	SC	CC
Al	1,25	1,66	1,60	1,23	1,09	1,23	1,62	1,68
Si	3,52	4,27	3,62	4,61	2,90	4,61	4,01	5,31
Ca	14,32	15,64	15,20	16,29	17,03	16,62	18,80	16,70

Fonte: Da autora (2024).

Nota: RMF = rejeito de minério de ferro; CA = carbonatação acelerada; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada; EQ: elemento químico; Al: alumínio; Si: sílica; Ca: cálcio.

De acordo com Richardson *et al.* (1999), valores de $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ maiores que 1,75 indicam uma quantidade aproximada de 30% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presentes na matriz. Segundo os autores, valores menores que 0,90 indicam que houve a assimilação total do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e sua transformação em CSH. Os valores obtidos para a equação $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ para os diferentes tratamentos estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18- Relação $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$.

CA/RMF	$\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$			
	0%	10%	20%	30%
SC	3,00	2,91	4,26	3,21
CC	2,64	2,78	2,85	2,40

Fonte: Da autora (2024).

Nota: CA = carbonatação acelerada; RMF = rejeito de minério de ferro; SC = sem carbonatação acelerada; CC = com carbonatação acelerada; Al: alumínio; Si: sílica; Ca: cálcio.

Verifica-se que a presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é maior que 30% em todos os tratamentos avaliados, o que confirma que o RMF utilizado não foi capaz de atuar como pozolana na mistura.

O painel carbonatado contendo 30% de RMF apresentou o menor valor para a relação $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$, indicando uma maior transformação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em CSH, confirmando o resultado obtido na curva termogravimétrica (Figura 17), onde é possível notar um pico mais acentuado na faixa de decomposição do CSH, em comparação com os outros tratamentos.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados neste estudo, pode-se concluir que:

- Os testes de atividade pozolânica confirmaram que o RMF não possui capacidade de atuar com pozolana na mistura.
- A densidade dos painéis contendo 30% de RMF foi maior estatisticamente que os demais painéis; esse resultado pode ser atribuído à densidade do RMF, fator que foi também observado em outros estudos. Todos os tratamentos apresentaram densidade dentro da norma EN 323 (2017).
- Não houve interação entre o RMF e a CA ($p>0,05$). Em geral, a cura por CA ocasionou a redução dos valores de AA 24h e IE 24h em aproximadamente 10%

para AA24h e 15% para IE24h. Os valores encontrados para IE 24h atendem as determinações do processo Bison (2017) e da norma EN 634-2 (2007).

- A inserção de RMF e a CA não influenciaram a condutividade térmica dos painéis, que alcançaram resultados satisfatórios em relação a EN 12664 (2004).
- A interação entre o percentual de RMF e a CA foi significativa ($p < 0,05$) para todas as propriedades mecânicas analisadas, exceto para LI. Os melhores resultados encontrados para MOE e MOR aconteceram para o tratamento contendo 30% RMF que passou pelo processo de CA. Esse tratamento atingiu todas as recomendações de Bison (2017) e da norma EN 634-2 (2007), o que pode ser atribuído à maior densidade obtida por esse painel.
- A CA influenciou significativamente ($p < 0,05$) todas as propriedades mecânicas analisadas, o que pode ser explicado pelo preenchimento dos poros e vazios na matriz pelo carbonato de cálcio, conforme evidenciado nas micrografias do estudo.
- A análise termogravimétrica revelou 4 picos principais relacionados à decomposição do CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, matéria vegetal e CaCO_3 . Em média, os tratamentos carbonatados apresentaram picos mais evidentes de CaCO_3 , enquanto o pico referente à desidroxilação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi menor, indicando a menor presença desse composto nos painéis carbonatados, o que reflete na eficiência do processo de CA.
- Maiores picos foram observados na faixa compreendida entre as temperaturas de 150°C a 350°C para os tratamentos contendo RMF, o que pode ser associado a decomposição do $\text{Fe}(\text{OH})_2$, ocorre nesse intervalo de temperatura.
- A partir da análise MEV-EDS, verificou-se pela relação $\text{Ca}/(\text{Al}+\text{Si})$, que o percentual de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ assimilado durante a reação de hidratação do cimento foi inferior a 30% para todos os tratamentos. O menor índice obtido foi observado para o tratamento contendo 30% de RMF, indicando maior assimilação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e formação de CSH, o que pode ter contribuído para melhoria de resistência mecânica desse tratamento, visto que o CSH é um dos principais componentes da hidratação do cimento, responsável pela resistência do material.

Os resultados deste estudo destacam o potencial do uso do RMF proveniente da barragem do Fundão em matrizes cimentícias. A utilização desses rejeitos na fabricação de

materiais de construção em larga escala, garante um fim adequado e mais seguro para esse material.

No entanto, novas pesquisas são necessárias, a fim de ratificar os bons resultados encontrados, bem como realizar novas análises. Como continuidade deste trabalho, sugere-se investigar a durabilidade do material frente ao envelhecimento natural e acelerado, além de explorar a adoção de tratamentos no RMF, a fim de reduzir o diâmetro das partículas, de forma a aumentar a capacidade pozolânica do material.

REFERÊNCIAS

ALI, I. M.; NARS, M. S; NAJE, A.S. Enhancement of cured cement using environmental waste: particleboards incorporating nano slag. **De Gruyter**, v. 10, p. 273-281, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 6 p. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653. Materiais Pozolânicos-Requisitos**. Rio de Janeiro, 6p. julho, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C**. Rio de Janeiro, 4 p. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-3. Chapas de madeira aglomerada -Parte 3: Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 51 p. Maio, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853: madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona**. Rio de Janeiro, 3 p. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895. Materiais Pozolânicos- Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado- Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 6p. julho, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752. Materiais Pozolânicos- Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 4p. julho, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 8 p. dez, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido**. Rio de Janeiro, 6 p. 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual book of ASTM: **D-1037 - Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles**. Materials Philadelphia, 2012.

BASTOS, L. A. de C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 1-9, 2016.

BERALDO, A.L; ARRUDA, A.C.; STANCATO, A.C.; SAMPAIO, C.A.P.; FERNANDES FILHO, O.P.; LEONEL, V.M. Compósito à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, Uberlândia, 2002. **Anais [...]**. Uberlândia: FECIV-UFU, 2002.

BIANCHI, O.; DAL CASTEL, C.; OLIVEIRA, R. V. B. Avaliação da Degradação Não-Isotérmica de Madeira Através de Termogravimetria-TGA. **Polímeros**, v. 20, p. 395-400, 2010.

BISON WOOD-CEMENT BOARD. **Technical handbook**. 36 p. Berlim: Bison Report, 2017.

BOTCHWAY, D. N-L.; AFRIFA, R. O.; HENAKU, C. Y. Effect of Partial Replacement of Ordinary Portland Cement (OPC) with Ghanaian Rice Husk Ash (RHA) on the Compressive Strength of Concrete. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 10, p. 353-363, 2020.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: J. Wiley, 689 p. 1963.

BUFALINO, L.; SOUZA, T. M.; LIMA, N. N.; SÁ, V. A.; TONOLI, G. H. D.; FERREIRA, C. A.; SAVASTANO, H.; SOUSA, R. B.; ZIDANES, U. L.; PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; MENDES, L. M. Contrasting the major characteristics of pinewood and Amazon hardwoods to provide high-quality cement-bonded particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 394, p. 132219, 2023.

CABRAL, M.R.; NAKANISHI, E. Y.; SANTOS, V.; GAUSS, C.; SANTOS, S. F.; FIORELLI, J. Evaluation of accelerated carbonation curing in cement bonded balsa particleboard. **Materials and Structures**, v. 51:52, p. 2-14, 2018.

CABRAL, M.R.; NAKANISHI, E. Y.; SANTOS, V.; GAUSS, C.; SANTOS, S. F.; FIORELLI, J. Evaluation of accelerated carbonation curing in cement bonded balsa particleboard. **Materials and Structures**, v. 51:52, p. 2-14, 2018.

CARBALLO, L. Q; PEREZ, M. R.; FERNÁNDEZ, D. C; AMORES, A. C; RODRÍGUEZ, J. M. F. Optimum Particle Size of Treated Calcites for CO₂ Capture in a Power Plant. **Materials**, v. 12, p. 1–17, 2019.

CHEN, L.; WANG, L.; TSANG, D. C. W.; MECHTCHERINE, V.; POON, C. S. Efficacy of green alternatives and carbon dioxide curing in reactive magnesia cement-bonded particleboards. **Journal of Cleaner Production**. v. 258, p120997, 2020.

CORADIN, V. T. R.; MUNIZ, G. I. B. **Normas de procedimentos em estudos de anatomia de madeira: I. Angiospermae; II. Gimnospermae**. Brasília: IBAMA. DIRPED, Laboratorio de Produtos Florestais, 1991. 19p. (IBAMA. DIRPED. LPF. Serie Tecnica, 15).

D'AGOSTINO, Luiz Fernando. **Praias de Barragens de Rejeitos de Mineração: Características e Análise da Sedimentação**. 374 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DWECK, J.; CUNHA, A. L. C.; PINTO, C. A.; GONÇALVES, J. P.; BÜCHLER, P. M. Thermogravimetry on Calcined Mass Basis – Hydrated Cement Phases and Pozzolanic Activity Quantitative Analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 97, p. 85-89, 2009. EL-HASSAN, H.; SHAO, Y. Carbon Storage through Concrete Block Carbonation Curing. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 287–291, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARD. **EN 12664: Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and**

low thermal resistance. Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 323: particleboard specifications.** Bruxelas, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 634-2: particleboard specifications.** Bruxelas, 2007. 22 p.

FONTES, W. C.; MENDES, J. C. SILVA, S. N.; PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 988-995, 2016.

FRICH, E. **The Bison system for production of wood cement particleboards.** In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials. Session III: Industrial Manufacturing Processes. USA. v. 1, p. 63-67, 1989.

GRAM, Hans-Erick. Durability of Natural Fibres in Concrete. **Sweden: Swedish Cement and Concrete Research Institute of Technology**, v. 1, p. 1-255, 1983.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**, v. 39, n. 6, p. 55-58, 1989.

RICHARDSON, I. G.; GROVES, G. W. Incorporation of minor and trace elements into calcium silicate hydrate (C-S-H) gel hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 131-138, 1999.

IAWA COMMITTEE. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 2, p. 219-332, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Infográfico Mineração em números 2022, 2023.** Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em: 15 dez. 2023.

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. **Rev. de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v. 14, n. 3, p. 217-223, 2015.

KALIYAVARADHAM, S. K.; LING, T. C. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C & D) waste- An overview. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 20, p. 234-242, 2017.

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.

KUSIN, M. F.; HASAN, S. N. M. S.; MOLAHID, V. L. M.; YUSUFF, F. M.; JUSOP, S. Carbon Dioxide sequestration of iron ore mining waste under low-reaction condition of a direct

mineral carbonation process. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 22188-22210, 20123.

LACAZ, F.A.C., PORTO, M.F.S., PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/ Samarco. **Rev. Bras. Saúde Ocup**, v. 42, 2017.

LATORRACA, João Vicente de Figueiredo. **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira**. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LEBORGNE, M. R.; GUTKOWSKI, R. M. Effects of various admixtures and shear keys in wood – concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1730–1738, 2010.

LIANG, C.; PAN, B.; MA, Z.; HE, Z.; DUAN, Z. Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103446, 2020.

MAGALHÃES, L.F.; FRANÇA, S.; OLIVEIRA, M. S.; PEIXOTO, R. A. F.; BESSA, S. A. L.; BEZERRA, A. C. S. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**. v. 274, p. 123260, 2020.

MANSUR, Rafaela. Quatro anos da tragédia em Brumadinho: 270 mortes, três desaparecidos e nenhuma punição. **G1/ Globo**. Belo Horizonte. 25 jan. 2023. Notícia. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2023/01/25/quatro-anos-da-tragedia-em-brumadinho-270-mortes-tres-desaparecidos-e-nenhuma-punicao.ghtml>>. Acesso em: 07 fev. 2023.

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

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 153-170, 2014.

MOSLEMI, A.; PFISTER, S. The influence of cement/ wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood- cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, v. 19, ed. 2, p. 165- 175, 1987.

PAPPU, A.; SAXENA, M.; ASOLEKAR, S. R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and Environment**, v. 42, p. 2311–2320, 2007.

PASSOS, F. P.; COELHO, P.; DIAS, A. (Des)territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG. **Caderno Metrópole**, São Paulo, v. 19, n. 38, p. 269–297, 2017.

PEREIRA JÚNIOR, Schubert Soares. **Desenvolvimento de argamassas contendo resíduos arenosos de mineração e estudos de suas propriedades visando sua utilização**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais). Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2011.

PIZZOL, V. D.; MENDES, L. M.; FREZZATI, 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.

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLERE, A.M.; AND DRON, R. Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires. **7 th International Congress Chemical Cement**, v. 3, p. 36-41, Paris, 1980.

ROCHA, C. A. A.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. Influence of Stone Cutting Waste and Ground Waste Clay Brick on the Hydration and Packing Density of Cement Pastes. **Journal of Ibracon Structures and Materials**, v. 6, p. 661-680, 2013.

SANTOS, R. C.; MENDES, L.M.; MORI, F.A.; MENDES, R. F. Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**. Lavras, v. 14, n. 3, p. 241- 250, 2008.

SHETTIMA, A. U.; HUSSIN, M. W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction Building Material**, v. 120, p. 72-79, 2016.

SHI, Zhengo. **Durability of Portland cement – calcined clay – limestone blends**. 281p. PhD Thesis (Interdisciplinary Nanoscience Centre (iNANO)), Aarhus University, Denmark, 2016.

SNELLINGS, R.; CHWAST, J.; CIZER, Ö.; DE BELIE, N.; DHANDAPANI, Y.; DURDZINSKI, P.; SANTHANAM, M. RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. **Materials and Structures**, v. 51 n. 6 p.172., 2018.

TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N.; LI, W. Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118903, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo. editores técnicos**. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

THIERY, M.; VILLAIN, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1047–1058, 2007.

VILARRUEL, D. C. V.; MIRANDA, E. H. N.; GOMES, D. A. C.; FURTINI, A. C. C.; SANTOS, C. A.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Evaluation of the addition of wheat residues in the production of *Pinus oocarpa* agglomerated panels. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25. p 1753-1760, 2023.

VILELA, A. P.; EUGÊNIO, T. M. C.; OLIVEIRA, F. F.; MENDES, J. F.; RIBEIRO, A. G. C.; VAZ, L. E. V. S. B; MENDES, R. F. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120883, 2020.

VILELA, A. P.; EUGÊNIO, T. M. C.; OLIVEIRA, F. F.; MENDES, J. F.; RIBEIRO, A. G. C.; VAZ, L. E. V. S. B; MENDES, R. F. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120883, 2020.

WAGMACKER, Diogo Nascimento. **Estudo sobre a influência da adição de resíduo de minério de ferro da barragem de Fundão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

YOUNG, G.; YANG, M. Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 152–156, 2019.

ZHANG, D.; GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Review on carbonation curing of cement-based materials. **Journal of CO₂**, v. 21, p. 119-131, 2017.