



KARINE FERREIRA

**POTENCIAL UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINERAÇÃO E
DE PARTÍCULAS MINERALIZADAS DE *Hevea brasiliensis*
PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO MADEIRA**

**LAVRAS - MG
2023**

KARINE FERREIRA

**POTENCIAL UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINERAÇÃO E DE PARTÍCULAS
MINERALIZADAS DE *Hevea brasiliensis* PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS
CIMENTO MADEIRA**

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

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes
Orientador

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

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

Ferreira, Karine.

Potencial utilização do rejeito de mineração e partículas mineralizadas de *Hevea brasiliensis* para produção de painéis cimento madeira / Karine Ferreira. - 2023.

43 p.

Orientador(a): Lourival Marin Mendes.

Coorientador(a): José Benedito Guimarães Junior.

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

Bibliografia.

1. Painel cimento madeira. 2. Construção civil. 3. Quartzito. I. Mendes, Lourival Marin. II. Junior, José Benedito Guimarães. III. Título.

KARINE FERREIRA

**POTENCIAL UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINERAÇÃO DE PARTÍCULAS DE
Hevea brasiliensis PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO MADEIRA**

**POTENTIAL USE OF MINING TAILINGS FROM PARTICLES OF *HEVEA*
BRASILIENSIS FOR THE PRODUCTION OF CEMENT WOOD PANELS**

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

APROVADA em 29 de maio de 2023.

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

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

Profa. Dra. Julia Naves Teixeira – FAPEMIG / RENOVA

Profa. Dra. Luciana Barbosa de Abreu - Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Prof. Dr. Mario Vanoli Stacolino – Universidade Federal Rural do Semi - árido (UFERSA)

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes
Orientador

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele não teria forças para enfrentar cada desafio.

Aos meus amados avôs Mary e José que acreditaram e investiram em mim, obrigada por serem minha inspiração e exemplo.

Ao Álvaro por todo companheirismo, paciência, compreensão, carinho e amor.

Aos meus irmãos e tias, por serem tão presentes e me trazerem amor e alegria em nosso convívio diário.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBiomat) pela oportunidade de realizar o mestrado.

A Capes, pela concessão da bolsa de estudos, o que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao querido professor Lourival, pela orientação, amizade e conhecimento repassados durante este período. Você é um exemplo de ser humano e de bondade.

Ao professor José Benedito por toda ajuda e conhecimento para realização deste trabalho.

Aos membros da banca de defesa, pelas colaborações, sugestões e avaliações deste trabalho.

Aos amigos de mestrado e funcionário da UEPAM. Em especial: Ianca, Loran, Danillo, Marina, Diogo, Felipe por toda ajuda, dedicação, paciência, companheirismo e amizade.

E todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos a mim ao longo desses anos, fazendo esta vida valer cada vez mais à pena.

RESUMO

O Brasil é reconhecido mundialmente pela produção e comercialização de rochas ornamentais, sendo uma delas o quartzito, o beneficiamento de rochas ornamentais geral anualmente cerca de 3.260.000 toneladas de resíduos, o que ocasiona sérios impactos ambientais. Pensando nisso, a presente pesquisa teve como objetivo desenvolver e avaliar painéis cimento-madeira, utilizando a madeira Seringueira (*Hevea Brasiliensis*) mineralizadas com sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e diferentes porcentagens do resíduo de quartzito (0, 10, 20 e 40%). Foram realizadas análises químicas da madeira, e também as propriedades físicas e mecânicas do painel. Para produção dos painéis foram utilizados cimento Portland CPV-ARI, partículas de Seringueira (*Hevea Brasiliensis*), sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) para mineralização e como aditivo o Cloreto de Cálcio (CaCl_2). A relação água/cimento foi de aproximadamente 40%, e madeira/cimento de 36,37%. A substituição de resíduo de quartzito causou uma redução nos valores de absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE). Não foi verificada nenhuma melhoria na propriedade de ligação interna. Maiores valores de MOE e MOR foram encontrados para os painéis com 20% de quartzito em substituição ao cimento. O tratamento com sulfato de alumínio melhorou a aderência da partícula de *Hevea brasiliensis* com o cimento e com o cimento-quartzito. Espera-se assim que a presente pesquisa contribua para o desenvolvimento de novas técnicas e materiais na construção civil, apresentando resultados conclusivos que comprovem ou não a eficiência da prática proposta. O reuso do quartzito na construção civil pode ainda representar um importante meio de contribuição ecológica uma vez que o quartzito é um produto largamente utilizado e que, portanto, gera uma grande quantidade de entulho nem sempre reutilizado para outros fins.

Palavras-chaves: Painel cimento-madeira. Construção civil. Quartzito. Sulfato de alumínio. Mineralizadas.

ABSTRACT

Brazil is recognized worldwide for the production and commercialization of ornamental rocks, one of which is quartzite, the processing of ornamental rocks generates around 3,260,000 tons of waste annually, which causes serious environmental impacts. With that in mind, the present research aimed to develop and evaluate wood-cement panels, using rubber tree wood (*Hevea Brasiliensis*) mineralized with aluminum sulfate ($Al_2(SO_4)_3$) and different percentages of quartzite residue (0, 10, 20 and 40%). Chemical analyzes of the wood were carried out, as well as the physical and mechanical properties of the panel. Portland cement CPV-ARI, rubber tree particles (*Hevea Brasiliensis*), aluminum sulfate ($Al_2(SO_4)_3$) for mineralization and calcium chloride ($CaCl_2$) were used to produce the panels. The water/cement ratio was approximately 40%, and wood/cement 36.37%. Replacement of quartzite residue caused a reduction in water absorption (AA) and thickness swelling (IE) values. There was no improvement in the internal bonding property. Higher MOE and MOR values were found for the panels with 20% quartzite replacing the cement. This research contributes to the development of new techniques and materials in civil construction, presenting conclusive results that prove or not the efficiency of the proposed practice. It is a widely used product and therefore generates a large amount of waste that is not always reused for other purposes.

Keywords: Cement-wood panel. Construction. Quartzite. Aluminum sulfate. Mineralized.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	8
1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS.....	9
3 REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1 Histórico dos painéis cimento-madeira	10
3.2 Painéis cimento-madeira	11
3.3 Mineralização	12
3.4 Resíduos de quartzito	13
3.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica	16
REFERÊNCIAS.....	17
SEGUNDA PARTE - ARTIGO	22
ARTIGO - TRATAMENTO COM $Al_2(SO_4)_3$ COMO ALTERNATIVA NA MELHORIA DA ADESÃO DA PARTÍCULA DE <i>Hevea brasiliensis</i> EM MATRIZ CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE QUARTZITO.....	22
1. INTRODUÇÃO	23
2. MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1 Matéria-prima	24
2.2 Caracterização do resíduo de quartzito.....	24
2.3 Caracterização do material lignocelulósico	25
2.4 Mineralização do material lignocelulósico.....	25
2.5 Produção dos painéis cimento-madeira	25
2.6 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis	27
2.7 Análise microestrutural.....	27
2.8 Análise dos resultados	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
3.1 Caracterização do resíduo de mineração	27
3.2 Caracterização do material lignocelulósico	29
3.3 Propriedades físicas dos painéis cimento-madeira	30
3.4 Propriedades mecânicas dos painéis cimento-madeira.....	33
4. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de fontes não renováveis de insumos, ao redor do mundo, tem promovido uma preocupação para os pesquisadores das áreas ambientais. As cadeias produtivas, além da extração de materiais da natureza, liberam resíduos com diferentes composições em várias etapas dos processos. A indústria brasileira de extração de pedras ornamentais é um setor em crescente aumento devido ao acréscimo do consumo dentro e fora do país (BEATRIZ *et al.*, 2013). O consumo exagerado dos recursos naturais, de forma desordenada, a grande geração de resíduos sólidos e o lançamento de gases na atmosfera contribuem para o aumento do efeito estufa, responsável pelas mudanças climáticas. Pensando nisso, pesquisas estão sendo desenvolvidas para mitigar problemas como a geração de resíduos sólidos, assunto discutido em encontros como a conferências de Estocolmo, em 1972, a ECO 92, no Rio de Janeiro e, em 1997, na de Tibilisi (DEUS *et al.*, 2015).

Os painéis de cimento de madeira são compósitos de matriz cimentícia reforçada por fibras de madeira, partículas, flocos e lã de madeira com diferentes formas e tamanhos (FERRAZ *et al.*, 2012). São uns dos produtos mais inovadores da indústria à base de madeira, devido as suas excelentes propriedades, como baixo custo de produção, fácil manuseio, curto período para fabricação, bom desempenho mecânico, baixa densidade, excelente durabilidade, bom isolamento acústico e térmico, alta estabilidade dimensional, dureza e alta resistência à água, fogo, fungos e ataque de insetos (ÇAVDAR; YEL.; TORUN, 2022). Estes compósitos são normalmente utilizados como material isolante ou material de construção (QUIROGA *et al.*, 2016). Além disso, estes painéis possuem uma série de vantagens em relação à madeira ou cimento de amianto, como, por exemplo, a alta resistência devido ao baixo peso (HAMOUDA *et al.*, 2015) e nenhuma emissão de resíduos tóxicos durante a produção e uso (TICHI *et al.*, 2016).

O quartzito é utilizado na produção de pedras de revestimento e pode ser facilmente transformado em placas com baixa alterabilidade (BARROS *et al.*, 2019). A exportação de quartzito, entre outras rochas ornamentais, apresenta papel de destaque no Brasil. No ano de 2017, aproximadamente 9 milhões de toneladas foram extraídas e 3,2 milhões de toneladas destinadas ao mercado internacional (GOODIER, 2016). Em 2018, o Brasil ficou entre os 5 maiores produtores globais, contribuindo com 5,4% da produção mundial (MONTANI, 2019). Com a alta demanda por esse material ocorre o aumento da extração e do beneficiamento do quartzito, promovendo a alta geração de resíduos produzidos durante a fabricação das peças. O resíduo de quartzito possui alto teor de silício (>95%) e apresenta

grande interesse para as indústrias, devido à alta resistência mecânica, durabilidade e alto impacto estético em projetos (ANDREOLA *et al.*, 2016). O desenvolvimento de tecnologias para o seu aproveitamento pode ser um ponto positivo para as indústrias que necessitam de compostos a base de silício como matéria prima (MIGUEL *et al.*, 2017). A alta comercialização no mercado interno e externo vem aumentando cada vez mais, assim, a quantidade de resíduos gerados é cada vez maior, com isso, maiores são os danos causados ao meio ambiente.

A seringueira (*Hevea brasiliensis*) é uma espécie nativa da região amazônica do Brasil e possui ampla importância para a economia do país, sendo largamente utilizada para obtenção de látex, utilizado para fabricação da borracha (IWAKIRI *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018). O Brasil utiliza a madeira de seringueira comumente para atividades como produção de biomassa e não tradicionalmente na indústria, entretanto, o material lignocelulósico pode ser aplicado em estruturas primárias, secundárias, construção leve e indústria de móveis, além de possuir um apelo ambiental, sendo uma opção no mercado para diminuir a demanda de madeira por espécies florestais nativas (EUFRADE JÚNIOR *et al.*, 2015; RAMOS *et al.*, 2016).

A degradação do material lignocelulósico ao longo do tempo, devido à alcalinidade do cimento é um problema atrelado à utilização dos painéis cimento madeira. Dessa forma, o processo de mineralização possui a finalidade de proteger as fibras vegetais, superficialmente, contra a agressão do meio alcalino proporcionado pela matriz cimentícia, imobilizando a matéria orgânica constituinte e diminuindo sua capacidade de absorção de água, evitando possíveis variações dimensionais (SARMIENTO E FREIRE, 1996). Produtos químicos como CaCl_2 (COURARD *et al.*, 2011) e $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)$ (MA *et al.*, 2010), também chamados de agentes de mineralização (mineralizadores), melhoram a compatibilidade do cimento e agregados de origem vegetal. Quando o sulfato de alumínio é utilizado, como mineralizante, impede a liberação de açúcar dos agregados orgânicos e reduz a higroscopicidade e a absorção de água (BOLTRYK; PAWLUCZUK, 2013). Além disso, a mineralização de agregados também leva a uma melhor adesão entre agregado e cimento (MAŁASZKIEWICZ; BOLTRYK, 2008).

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivos avaliar o efeito nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de painéis cimento-madeira, produzidos com madeira de seringueira mineralizada com sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e com substituição parcial do cimento por resíduo de quartzito (10, 20 e 40%).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Histórico dos painéis cimento-madeira

Os compósitos feitos com madeira e cimento surgiram em meados do século XIX, com placas de aparas de madeira ligadas ao gesso. Em 1920 foram produzidas placas de cimento de lã de madeira com densidade de 400 kg/m^3 . Em 1930 começou-se o desenvolvimento de placas de cimento de aparas de madeira com uma densidade de 600 kg/m^3 , entretanto, nesse ano não havia uma forte procura de compósitos de cimento-madeira para aplicações industriais. Em 1960, as placas de cimento de partículas grossas de madeira eram confeccionadas com uma faixa de densidade entre 500 a 700 kg/m^3 , mas em 1970 as placas de partículas de cimento ligado foram desenvolvidas com altas densidades, entre 1250 a 1400 kg/m^3 (STOKKE *et al.*, 2013; BRAHMIA *et al.*, 2020). Entre os anos 60 e 70, as pesquisas começaram a se concentrar no efeito da proporção de cimento e madeira nas propriedades dos painéis, sendo que os resultados dos trabalhos voltados para essa área apresentavam variação de acordo com a geometria e dimensão das partículas utilizadas, tratamentos, espécies de madeira, massa específica, pH, umidade, densidade, composição química, entre outros fatores (MOSLEMI; PFISTER, 1986).

Os painéis de cimento-madeira surgiram na Europa, como elemento construtivo, no final da década de 70 (MATOSKI; IWAKIRI, 2007). As placas de cimento-madeira são comumente usadas na Europa para fachadas, pisos, móveis resistentes ao fogo e à umidade, o intuito era substituir as placas de fibrocimento em aplicações estruturais (STOKKE *et al.*, 2013). Em 1990, os produtos de placa de lã de cimento-madeira foram desenvolvidos e sua densidade aumentou para 900 kg/m^3 . No início do século 21 as placas de cimento de madeira eram produzidas com uma densidade de 1000 a 1100 kg/m^3 (STOKKE *et al.*, 2013).

A forma da madeira utilizada, ou seja, fibras, partículas, fios picados, flocos ou lã de madeira tem efeito nas propriedades mecânicas e na utilização dos compósitos de cimento-madeira (ABDALLAH; ABDELGADIR, 2006; HANNANT *et al.*, 2018). Na construção civil é comumente utilizado o compósito cimento-madeira como painel, entretanto, estão sendo estudados para sua utilização nos principais elementos estruturais das edificações, como as vigas (BEJÓ *et al.*, 2005; FRYBORT *et al.*, 2008). Além disso, geralmente é usado para aplicações internas e externas, devido às propriedades de resistência (NA *et al.*, 2014).

Ao longo dos anos, muitos aspectos da construção civil melhoraram, desde o processo de fabricação até os materiais de construção utilizados, atraindo visibilidade para os painéis de cimento-madeira, pois reúne propriedades desejáveis presentes na madeira e no cimento

(COATES, 1994; FRYBORT *et al.*, 2008). A resistência ao fogo dos painéis de cimento-madeira é melhor que a da madeira e possuem maior resistência à tração e flexão do que o concreto, além de ser mais leve (DEPLAZES, 2005; KOSMATKA *et al.*, 2008).

3.2 Painéis cimento-madeira

Entre os materiais que podem ser produzidos a partir de materiais alternativos estão os painéis de cimento-madeira (CLARAMUNT *et al.*, 2015). São compósitos de matriz cimentícia reforçada por fibras de madeira, partículas, flocos e lã de madeira com diferentes formas e tamanhos (FERRAZ *et al.*, 2012). É importante ressaltar que nem todas as espécies de madeira apresentam boa ligação com o cimento, pois cada espécie possui estruturas e composições químicas diferentes, sendo um fator de impacto na produção dos painéis de cimento-madeira. Embora o tipo de madeira seja importante, o local de crescimento e a idade podem fazer a diferença (WEI *et al.* 2000; FRYBORT *et al.* 2008; ALPÁR *et al.* 2011). Devido a essa problemática, diversas pesquisas foram realizadas ao longo dos anos sobre este tema utilizando diferentes espécies de madeira, tipos de cimento e aditivos de cura, para produção de compósitos de cimento-madeira com melhorias para várias aplicações.

Os painéis de cimento-madeira possuem diversos procedimentos de fabricação, sendo o mais simples, eficaz e comum à técnica de misturar a madeira triturada, água e cimento. Entretanto, o aspecto mais importante na fabricação de produtos de cimento-madeira são as proporções de madeira/cimento e cimento/água (PHILLIPS; HSE, 1987). Para produção de painéis, o material é prensado, precisando apenas de 24 horas para curar e atingir a resistência máxima. Além disso, os compósitos de cimento-madeira são mais leves que o concreto e de fácil manuseio, sendo economicamente viável e fabricado em um curto período de tempo. Estes compósitos são normalmente utilizados como material isolante ou material de construção (QUIROGA *et al.*, 2016). Gunduz *et al.* (2018) afirmaram que os painéis aglomerados cimentícios, com forma composta, são eficazes para aplicação em termos de barreiras acústicas externas ao ruído.

Estes painéis possuem uma série de vantagens em relação à madeira ou cimento de amianto, como, por exemplo, a alta resistência atrelada ao baixo peso (HAMOUDA *et al.*, 2015) e nenhuma emissão de resíduos tóxicos durante a produção e uso (TICHI *et al.*, 2016). No entanto, a ligação CH, remanescente na matriz cimentícia hidratada, proporciona o aumento do pH do reforço vegetal para aproximadamente 12,5, causando inchaço, dissolução e degradação da madeira (FAN *et al.*, 2012). Este aumento de pH remove grande parte dos extrativos e dissolve porções consideráveis dos componentes da madeira, principalmente as

hemiceluloses, além disso, causa mudanças químicas, físicas e mecânicas no compósito cimento-madeira. Para reduzir a alcalinidade causada pela matriz cimentícia, alguns autores têm recomendado o uso de mineralizantes para o reforço (BALCIUNAS *et al.*, 2015; BALCIUNAS *et al.*, 2018) e de pozolanas, como metacaulim (DIAZ, 2016; RIBEIRO, 2016) e cerâmicas calcinadas (LIMA *et al.*, 2011).

3.3 Mineralização

O processo de mineralização possui a finalidade de proteger as fibras vegetais, superficialmente, contra a agressão do meio alcalino proporcionado pela matriz cimentícia, imobilizando a matéria orgânica constituinte e diminuindo sua capacidade de absorção de água, evitando possíveis variações dimensionais. Mineralizantes complexos, como o sulfato de alumínio e o hidróxido de cálcio podem reduzir ao mínimo a incompatibilidade química e das reações de pega e endurecimento do cimento; proporcionando melhor qualidade dos compósitos produzidos (SARMIENTO E FREIRE, 1996). Produtos químicos como CaCl_2 (COURARD *et al.*, 2011) e $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)$ (MA *et al.*, 2010), também chamados de agentes de mineralização (mineralizadores), melhoram a compatibilidade do cimento e agregados de origem vegetal.

Quando o sulfato de alumínio é utilizado, como mineralizante, impede a liberação de açúcar dos agregados orgânicos e reduz a higroscopicidade e a absorção de água. O sulfato de alumínio na forma de hidrato é característico de reação ácida em água ($\text{pH} = 3-5$). A inserção de mineralizantes, como a cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reação alcalina em água ($\text{pH} = 11-12$), aumenta a eficiência do sulfato de alumínio, neutraliza o ambiente ácido causado pelo $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e melhora a trabalhabilidade da mistura (BOLTRYK; PAWLUCZUK, 2013). Além disso, a mineralização de agregados também leva a uma melhor adesão entre agregado e cimento (MAŁASZKIEWICZ; BOLTRYK, 2008).

O estudo de Balciunas *et al.* (2015) utilizou soluções de hidróxido de sódio e cloreto de alumínio para o tratamento das fibras (mineralização), o intuito foi melhorar a adesão da matriz e das fibras. Verificou-se que os tratamentos aplicados nas fibras de cânhamo neste estudo melhoraram apenas a resistência à flexão. Entretanto, o tratamento alcalino melhorou a resistência mencionada em aproximadamente 94% em comparação com a pasta de cimento. Portanto, o tratamento alcalino afeta não apenas a resistência da fibra, mas também a adesão fibra-matriz de forma positiva.

O processo de mineralização para os agregados vegetais pode aumentar a resistência à compressão em até 8 vezes, quando comparados com compósitos sem agregados

mineralizados (BALCIUNAS *et al.*, 2015). Além disso, é um processo responsável pela neutralização dos compostos prejudiciais à hidratação do cimento, como sacarídeos, ácidos graxos, dentre outros, que podem inibir o comportamento de ligação do cimento e reduzir a sua resistência (DIQUÉLOU *et al.*, 2016).

A mineralização, com sulfato de alumínio e hidróxido de sódio, é benéfica em termos de proteção ambiental, pois os compósitos com ligante de cimento e Ca(OH)_2 absorvem da atmosfera e do meio ambiente o dióxido de carbono (CO_2). Este efeito é determinado pela reação de carbonatação da cal hidratada (Ca(OH)_2) utilizada para mineralização dos agregados e carbonização de produtos de hidratação do cimento (portlandita). Portanto, quando a taxa de eficiência de carbonização é de 100%, 1 tonelada de cimento pode absorver 0,5 tonelada de CO_2 (BOLTRYK; PAWLUCZUK, 2013).

3.4 Resíduos de quartzito

A extração do quartzito promove o surgimento de problemas ambientais, como a desconfiguração do terreno natural e da paisagem, assoreamento de córregos, remoção da mata ciliar e desestabilização das encostas, contendo os resíduos de mineração, como apresentado na Figura 1. O reuso dos resíduos de quartzito, na produção de materiais, representa uma economia para as empresas através da reutilização de resíduos beneficiados e exclusão de pré-tratamentos para destinação em aterros sanitários. Além disso, a utilização desses resíduos é fundamental para promover o crescimento da indústria da construção civil e diminuir os problemas ambientais gerados pela extração de quartzito de jazidas.



Figura 1 - Jazida de extração do quartzito, situada na cidade de São Tomé das Letras/MG.
Fonte: Adaptado de Júnior *et al.* (2019).

Júnior *et al.* (2019) estudaram a reutilização dos resíduos provenientes da extração de quartzito na cidade de São Tomé das Letras no estado de Minas Gerais. Os autores relatam que a extração do material é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos, que

apresentam potencial para serem incorporados na síntese de concretos de alto desempenho. Os materiais produzidos com resíduos de quartzito são passíveis de apresentar resistência à compressão próxima de 150 MPa e atuam como bons agregados na produção de concretos de alta performance.

A utilização de resíduos de quartzito na produção de cerâmicas sanitárias foi avaliado como sendo uma alternativa para diminuir a quantidade de resíduos e a consequente diminuição dos custos operacionais. Os autores aplicaram o resíduo de quartzito como substituinte ao material fundente (geralmente feldspato), utilizado para promover uma estrutura mais densificada pela junção das fases cristalinas (mulita) e a fase com ordenamento atômico de curto alcance (amorfo). Os resultados demonstraram que a composição química do resíduo é similar ao material fundente utilizado, comumente, na indústria de produção de louças sanitárias. As peças cerâmicas produzidas com substituição superior a 15% apresentaram valores de resistência superiores a 35 MPa e absorção de água próxima de 0,5%, valores aceitáveis para esta classe de materiais. Desta forma, a adição de resíduos de quartzito pode ser realizada acima de valores de 15%, para a obtenção de materiais com baixa porcentagem de poros, devido, principalmente, às propriedades fundentes dos resíduos citados. A reutilização do resíduo de quartzito como material fundente pode representar uma diminuição nos custos do material final. A produção de materiais cerâmicos, utiliza na grande parte de suas formulações, misturas contendo até 50% em peso de material do grupo dos feldspatóides. A adição destes materiais promove a diminuição da temperatura e do tempo de queima de cerâmicas com grande valor agregado, como os porcelanatos. O uso de materiais fundentes na formulação promove a diminuição do tempo de queima de 50 – 90 horas para 90 minutos. Enquanto a temperatura de queima decresce para valores próximos de 1180 °C. Desta maneira, o uso de subprodutos da extração de quartzito na indústria cerâmica representa uma grande economia energética e agrega maior sustentabilidade ao produto final obtido.

De acordo com Ferreira (2013, apud Pinheiro 2003) “*o consumo total de agregados no Brasil no ano de 2003 foi da ordem de 22,8 milhões de toneladas de brita e 33,0 milhões de toneladas de areia*”. Ferreira (2013) demonstra que o consumo de agregados pela indústria da construção é elevado e que a inserção de materiais alternativos, sem a perda das propriedades finais do produto fabricado, pode representar economia para o setor. No mesmo trabalho, o autor demonstra que a fabricação de concretos fabricados pela substituição de 100% dos agregados tradicionais pelos resíduos de quartzito é possível. Valores médios de resistência à compressão dos corpos de prova foram próximos de 31,7 MPa.

Em contrapartida, a pesquisa realizada por Hasparyk (2005), apresenta a necessidade de se acompanhar a estabilidade química das estruturas produzidas com a adição de resíduos de quartzito no concreto à base de cimento Portland. Os autores relatam que a estrutura da Usina Hidrelétrica de Furnas, situada na cidade de São José da Barra/MG, construída na década de 50, apresenta em sua composição, agregados provenientes da extração de quartzito. As análises do material demonstraram que o concreto apresenta patologias provenientes das Reações de Álcali Agregado (RAA) devido, principalmente, à reatividade do quartzito da região. Os resultados apresentados na Figura 2, demonstram modelos construídos pelos pesquisadores e relatam a diminuição das propriedades mecânicas, devido às reações álcali-silica presentes nas amostras estudadas após longos períodos de exposição ao ambiente.

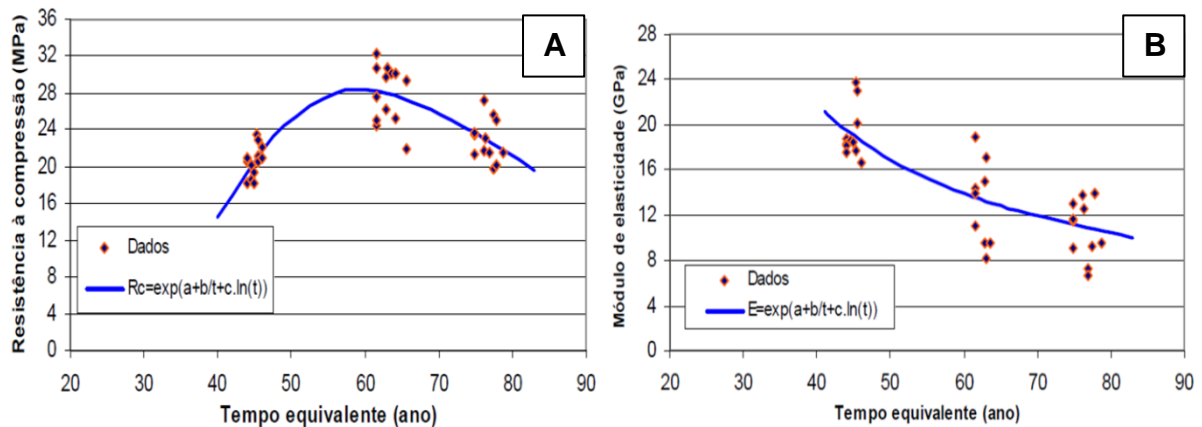


Figura 2 – Modelos referentes aos resultados de ensaio: (A) a resistência à compressão e (B) ao módulo de elasticidade.

Fonte: Adaptado de Hasparyk (2005).

Os dados experimentais com os corpos de prova de concreto e a sua modelagem permitiram constatar que enquanto o módulo cai, a resistência pode aumentar até atingir um pico a partir do qual passa a cair ao longo do tempo. Durante um tempo equivalente de 35 anos o módulo cai cerca de 46% enquanto que em um primeiro estágio, em 16 anos, a resistência aumenta em até 46% até atingir um ponto máximo e depois cai no tempo. Os modelos mostram que as quedas tanto do módulo como da resistência à compressão, em idades mais avançadas e em torno de 20 anos, chegam a aproximadamente 24%. Os autores salientam que os tempos e valores apresentados no estudo devem ser considerados com cuidado uma vez que se restringem à amostragem realizada para a pesquisa apresentada. Para um melhor controle das RAA nos materiais contendo resíduos de quartzito se faz necessária a realização de um número maior de ensaios de forma a validar ou aperfeiçoar os modelos.

3.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica

As informações até aqui apresentadas contextualizam o estado da arte dessa pesquisa. O estudo a ser realizado engloba os fundamentos básicos para conhecimento das propriedades do material reciclado, contribuindo para o avanço de tecnologias relacionadas ao desenvolvimento de novos produtos, de técnicas de reciclagem e à análise de sustentabilidade do setor.

O uso de resíduos além das vantagens de sustentabilidade, pode proporcionar diminuição energética da exploração e custos de manutenção dos resíduos, configurando-se em uma oportunidade técnica, ambiental e econômica.

Construir de forma sustentável ainda é um grande desafio, porém a construção civil precisa ser mais econômica e racional, utilizando materiais que reduzam entulhos e perdas, que otimizem os processos e que causem menores impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, A. M. A.; ABDELGADIR, A. Y. Effect of cement/ wood ratio and particle size on some properties of *Acaci nilotica* wood-cement aggregates. **Sudan Silva** 12(i), 41-52, 2006.
- ALPÁR, L.; PAVLEKOVICS, A. A.; CSOKA, L.; HORVATH, L. Wood wool cement boards produced with nano minerals. **International Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP2011)**, 75-82, 2011.
- BALCIUNAS, G.; PUNDIENE, I.; BORIS, R.; KAIRYTE, A.; ZVIRONAITE, J.; GARGASAS, J. Long-term curing impact on properties, mineral composition and microstructure of hemp shive-cement composite. **Construction and Building Materials**, 188, 326–336, 2018.
- BALCIUNAS, G.; PUNDIENE, I.; LUKOSIUNE, L. L.; VEJELIS, S.; KORJAKINS, A. Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical–mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. **Industrial Crops and Products**, 77, 724–734, 2015.
- BEJÓ, L.; TAKÁTS, P.; VASS, N. Development of cement bonded composite beams. **Acta Silvatica Et Lignaria Hungarica**, vol. 1, 111-119, 2005.
- BOLTRYK, M., PAWLUCZUK, E. Properties of a lightweight cement composite with an ecological organic filler. **Construction and Building Materials**. 51, 97–105. 2013.
- BRAHMIA, F. Z.; HORVÁTH, P. G.; ALPÁR, T. L. Cement wood composites. **BioResources** 15(3), 7288-7308. 2020.
- CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; FERNANDEZ-CARRASCO, L. J. Wet/dry cycling durability of cement mortar composites reinforced with micro and nanoscale cellulose pulps. **BioResources** 10, 3045–3055, 2015.
- COATES, G. R. Product application of wood-cement particleboards including applied finishes. In: international inorganic-bonded wood and fiber composite materials conference. Washington. **Proceedings...** Madison: Forest Products Society. v. 1, p. 189-192, 1994.
- COURARD, L.; DARIMONT, A.; LOUIS, A.; MICHEL, L. Mineralization of bio-based materials: effect on cement-based mix properties. *Bull. Polytech. Inst. Jassy Constr.* 54, 2011.
- DEPLAZES, A. Constructing architecture materials processes structures. Birkhäuser - Publishers for **Architecture**, 60-112, 2005.
- DIAZ, J. P. V. **Mechanical Behavior of Pupunha Fiber Reinforced Cementitious Composites**. Masters Thesis Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

DIQUÉLOU, Y.; GOURLAY, E.; ARNAUD, L.; KUREK, B. Influence of binder characteristics on the setting and setting of hemp lightweight concrete, **Constr. Build. Mater.** 112, 506–517, 2016.

F. B. S. FERREIRA, “**Avaliação da Utilização de Resíduos de Quartzito como Agregado em Microconcretos**” Universidade Federal de São João del-Rei, 2017.

FAN, M.; NDIKONTAR, M. K.; ZHOU, X.; NGAMVENG, J. N. Cement-bonded composites made from tropical woods: compatibility of wood and cement. **Construct. Build. Mater.** 36, 135–140, 2012.

FERRAZ, J. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SARZA, M. R.; OKINO, E. Y. A.; MARTINZ, S. A. Compatibility of pretreated coir fibers (*Cocos nucifera* L.) with Portland cement to produce mineral composites. **International Journal of Polymer Science**, 2012.

FRYBORT, S.; MAURTIZ, R.; TEISCHINGER, A.; MÜLLER, U. Cement bonded composites - A mechanical review. **BioResources** 3(2), 602-626, 2008.

GUNDUZ, L.; KALKAN, S. O.; ISKER, A. M. Effects of using cement-bonded particle boards with a composite component in terms of acoustic performance in outdoor noise barriers. The Eurasia Proceedings of **Science Technology Engineering and Mathematics** (4), 246-255, 2018.

HAMOUDA, T.; SEYAM, A. F. M.; PETERS, K. Evaluation of the integrity of 3D orthogonal woven composites with embedded polymer optical fibers. **Composites Part B: Engineering** 78, 79–85, 2015.

HANNANT, D. J.; VENKATA, S. B.; SIVER; SREEKANTH, P. S. R. Cement-based composites, **Comprehensive Composite Materials II** 5, 379-420, 2018.

I. F. JUNIOR, R. P. RIBEIRO, M. H. DA SILVA, F. S. AURELIANO, A. A. F. COSTA, AND V. L. G. GARCIA, “**Study of reactive powder concrete using quartzite tailings from the state of Minas Gerais - Brazil**,” *Procedia Manuf.*, vol. 38, no. Faim 2019, pp. 1758–1765, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.091.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. Design and control design and control of concrete mixture. **Engineering Bulletin** 001, 1-228, 2008.

L. KOSHIMIZU, C. GIBERTONI, M. R. MORELLI, S. CARLOS, AND S. GERTRUDES, “**Estudo de fundentes alternativos para uso em formulações de porcelanato** Study of the use of alternative fluxing agents for feldspar in porcelainized stoneware tile compositions,” *Cerâmica*, vol. 56, no. 339, pp. 262–272, 2010.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S.; LOMELÍ-RAMÍREZ, M. G. Use of *Pinus* spp. Residues, high reactivity metakaolin and calcined ceramic residue in cement-wood composites. **Madera Bosques** 17, 47–65, 2011.

MA, F. L.; YAMAUCHI, H.; PULIDO, R. O.; TAMURA, Y.; SASAKI, H.; KAWAI, S. Manufacture of Cement bonded Boards from Wood and Other Lignocellulosic Materials: Relationships between Cement Hydration and Mechanical Properties of Cement-bonded Boards. **Wood–Cement Composites in the Asia-Pacific Region**. 13-23. ISBN 186320346. 2010.

MAŁASZKIEWICZ, D.; BOŁTRYK, M. Optimisation of composition of lightweight concrete with organic filler in the form of *Phragmites australis* reed. Role for concrete in global development. **Proceedings of the International Conference**, Dundee, Scotland, UK, 481–490. 2008.

MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 149-158, 2007.

MOSLEMI, A. A.; PFISTER, S. C. The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science** 19(2), 165-175. 1986.

N. P. HASPARYK, “**Investigação De Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado E Caracterização Avançada Do Gel Exsudado,**” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

NA, B.; WANG, Z.; WANG, H.; LU, X. Wood-cement compatibility review. **Wood Research** 59(5), 813-826, 2014.

P. S. S. DE MEDEIROS, H. D. L. LIRA, M. A. RODRIGUEZ, R. R. MENEZES, G. D. A. NEVES, AND L. N. D. L. SANTANA, “**Incorporation of quartzite waste in mixtures used to prepare sanitary ware,**” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 2148–2156, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.02.001.

PHILLIPS, D. R.; HSE, C. Y. Effect of cement / wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures. **Wood and Fiber Science** 19(3), 262-268, 1987.

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers. **Composites Part B: Engineering** 84, 25-32, 2016.

RIBEIRO, U. G. **Thermal, Acoustic and Mechanical Performance of Cement Composites Produced with Waste from the Porto Velho Timber Industry.** Master’s Thesis, Federal University of Amazonas, Manaus, Brazil, 2016.

SARMIENTO, C. R.; FREIRE, W. J. Tratamento aplicado ao bagaço de cana-de- açúcar visando sua utilização para fins de material de construção. In: **Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil.** Anais... São Paulo: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, pp. 132-37. 1996.

STOKKE, D. D.; WU, Q.; HAN, G. Introduction to wood and natural fiber composites. Wiley Series in **Renewable Resources**, Belgium, 314 Pages, 2013.

TICHI, A. H.; BAZYAR, B.; KHADEMIESLAN, H.; RANGAVAR, H.; TALAEIPOUR, M. The effect of nano-wollastonite on biological, mechanical, physical and microstructural properties of the composite made of wood-cement fiber. **J. Fund. Appl. Sci.** 8, 1466–1479, 2016.

WEI, Y. M.; GUANG ZHOU, Y.; TOMITA, B. Hydration behavior of wood cement-based composite I: Evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary portland cement. **Journal of Wood Science** 46(4), 296-302, 2000.

**POTENCIAL DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO E DA MADEIRA *Hevea brasiliensis*
NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA**

Karine Ferreira¹, Lorrان de Sousa Arantes¹, Ianca Oliveira Borges¹, Felipe Gomes Batista^{1*},
Dayane Targino de Medeiros¹, Lourival Marin Mendes¹, José Benedito Guimarães Junior²

Karine Ferreira

ORCID: 0009-0009-3886X

E-mail: karine.ferreira1@estudante.ufla.br

Lorrان de Sousa Arantes

ORCID: 0000-0002-4472-2292

E-mail: lorrان.arantes@ufla.br

Ianca Oliveira Borges

ORCID: 0000-0003-4370-4705

E-mail: iancaborges@hotmail.com

Felipe Gomes Batista*

ORCID: 0000-0002-0210-7026

E-mail: felipejp.gomes@gmail.com

Dayane Targino de Medeiros

ORCID: 0000-0002-1255-572X

E-mail: dayanemedeiost@gmail.com

Lourival Marin Mendes

ORCID: 0000-0001-8713-405X

E-mail: lourival@ufla.br

José Benedito Guimarães Junior

ORCID: 0000-0002-9066-1069

E-mail: jose.guimaraes@ufla.br

AFFILIATIONS

¹Department of Forest Science, Federal University of Lavras (UFLA), C.P. 3037, 37200-900, Lavras, MG, Brazil

²Department of Engineering, Federal University of Lavras (UFLA), C.P. 3037, 37200-900, Lavras, MG, Brazil

*Corresponding author

TRATAMENTO COM $Al_2(SO_4)_3$ COMO ALTERNATIVA NA MELHORIA DA ADESÃO DA PARTÍCULA DE *Hevea brasiliensis* EM MATRIZ CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE QUARTZITO

Resumo

A incorporação de resíduos em matrizes cimentícias é uma alternativa viável na obtenção de novos produtos para a construção civil e, uma solução sustentável para a destinação dos materiais descartados pelas indústrias. Neste contexto, objetivou-se avaliar o potencial do uso de quartzito e partículas de *Hevea brasiliensis* tratadas com sulfato de alumínio [$Al_2(SO_4)_3$] na produção de painéis cimento-madeira. Resíduos de quartzito e partículas da madeira *Hevea brasiliensis* foram obtidos e caracterizados. As partículas de madeira foram mineralizadas com $Al_2(SO_4)_3$ na concentração de 9%. Os painéis foram produzidos com cimento Portland CPV-ARI, cloreto de cálcio ($CaCl_2$) como aditivo, partículas de madeira tratadas e adição de quartzito em diferentes proporções (0, 10, 20 e 40%), totalizando quatro tratamentos. Determinaram-se as propriedades físico-mecânicas e microestrutural dos painéis. A mineralização das partículas contribuiu na aderência no cimento-madeira. A incorporação de 20% de quartzito contribuiu com a melhoria na absorção de água e inchamento em espessura dos painéis e no aumento dos valores do módulo de elasticidade (MOE) e do módulo de ruptura (MOR). Os painéis cimento-madeira foram adequados para uso não estruturais e internos, sendo necessários novos estudos para avaliar métodos alternativos de substituição destes resíduos.

Palavras-chave: Quartzito, material lignocelulósico, mineralização, propriedades físico-mecânico.

Abstract

The incorporation of residues in cement matrices is a viable alternative in obtaining new products for civil construction and a sustainable solution for the disposal of materials discarded by industries. In this context, the objective was to evaluate the potential use of quartzite and particles of *Hevea brasiliensis* treated with aluminum sulfate [$Al_2(SO_4)_3$] in the production of cement-wood panels. Quartzite residues and *Hevea brasiliensis* wood particles were obtained and characterized. The wood particles were mineralized with $Al_2(SO_4)_3$ at a concentration of 9%. The panels were produced with CPV-ARI Portland cement, calcium chloride ($CaCl_2$) as additive, treated wood particles and addition of quartzite in different proportions (0, 10, 20 and 40%), totaling four treatments. The physical-mechanical and microstructural properties of the panels were determined. The mineralization of the particles contributed to the adherence to the wood-cement. The incorporation of 20% quartzite contributed to the improvement in water absorption and swelling in the thickness of the panels and in the increase in the modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) values. The cement-wood panels were suitable for non-structural and internal use, requiring further studies to evaluate alternative methods of replacing these residues.

Keywords: Quartzite, lignocellulosic material, mineralization, physico-mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

A extração de pedras ornamentais no Brasil é um setor com demanda crescente devido ao alto consumo dos minerais, gerando grande quantidade de resíduos sólidos e, conseqüentemente causando sérios problemas ambientais (Vazzoler et al. 2018). Pesquisas sugerem a incorporação desses resíduos em matrizes de cimento para uso em argamassas, como forma de alcançar seu aproveitamento sustentável (André et al. 2014; Schackow et al. 2015).

Os painéis cimento madeira são compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras, partículas, flocos e lã de madeira com diferentes formas e tamanhos (Ferraz et al. 2012). São produtos inovadores da indústria à base de madeira, devido as suas excelentes propriedades, como baixo custo de produção, fácil manuseio, curto período de fabricação, bom desempenho mecânico, baixa densidade, excelente durabilidade, bom isolamento acústico e térmico, alta resistência ao fogo e ao ataque de xilófagos (Çavdar et al. 2022).

O quartzito é utilizado na produção de pedras de revestimento e pode ser facilmente transformado em placas que podem sofrer modificações (Júnior et al. 2018). A exportação de quartzito, entre outras rochas ornamentais, apresenta papel de destaque no Brasil. No ano de 2017, aproximadamente 9 milhões de toneladas foram extraídas e 3,2 milhões de toneladas destinadas ao mercado internacional (Bahadori and Smith 2016). Com a alta demanda por esse material, ocorre o aumento da extração e do beneficiamento do quartzito, promovendo a alta geração de resíduos produzidos durante a fabricação das peças. O resíduo de quartzito possui alto teor de silício (>95%) e apresenta grande interesse para as indústrias, devido à alta resistência mecânica, durabilidade e alto impacto estético em construções (Andreola et al. 2016). O desenvolvimento de tecnologias para o seu aproveitamento pode ser um ponto positivo para as indústrias que necessitam de materiais a base de silício como matéria prima (Altoé and Vidal 2017).

A seringueira (*Hevea brasiliensis*) é uma espécie nativa da região amazônica do Brasil e possui ampla importância para a economia do país, sendo largamente utilizada para obtenção de látex, utilizado para fabricação da borracha (Iwakiri et al. 2017; Silva et al. 2018). O Brasil utiliza a madeira de seringueira para produção de biomassa e não tradicionalmente na indústria, entretanto, o material lignocelulósico pode ser aplicado em estruturas primárias, secundárias e na indústria de móveis, além de possuir um apelo ambiental, sendo uma opção no mercado para diminuir a demanda de madeira por espécies florestais nativas (Eufrede Júnior et al. 2015; Ramos et al. 2016).

A degradação do material lignocelulósico ao longo do tempo, devido à alcalinidade do cimento é um desafio atrelado à utilização dos painéis cimento madeira. Dessa forma, o processo de mineralização possui a finalidade de proteger as partículas de madeira, superficialmente, contra a agressão do meio alcalino proporcionado pela matriz cimentícia, imobilizando o material lignocelulósico e diminuindo sua capacidade de absorção de água, evitando possíveis variações dimensionais (Sarmiento and Freire 1997). Produtos químicos chamados de agentes de mineralização melhoram a compatibilidade do cimento com o material lignocelulósico (Ma et al. 2002; Courard et al. 2011). O sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$, quando utilizado como mineralizante, impede a liberação de açúcar dos materiais lignocelulósicos e reduz a higroscopicidade e a absorção de água (Boltryk and Pawluczuk 2013). Além disso, a mineralização também leva a uma melhor adesão entre partícula de madeira e cimento (Małaszkiwicz and Boltryk 2008).

Diante disto, o presente estudo buscou melhorar a adesão da partícula de *Hevea brasiliensis* na matriz cimentícia através do tratamento com $Al_2(SO_4)_3$ e, avaliar o potencial de utilização do quartzito em substituição ao cimento para produção de painéis cimento-madeira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matéria-prima

Para produção dos painéis cimento-madeira foi utilizado resíduos de mineração da empresa Mosaico São Tomé Ltda, localizada na cidade de Luminárias, Minas Gerais, Brasil. A madeira de *Hevea brasiliensis* foi proveniente de plantios experimentais da Universidade Federal de Lavras. Após o corte, toras de 4 m de comprimento foram seccionadas em toretes de 58 cm, os quais foram armazenados em um tanque contendo água quente por 24 h. Posteriormente, os toretes foram laminados em torno laminador, no qual as lâminas produzidas passaram por moinho martelo para geração de partículas do tipo *silver*. O material particulado foi peneirado, por meio de conjunto de peneiras sobrepostas, cujas aberturas foram de 12 mesh (superior) e 40 mesh (inferior), respectivamente.

2.2 Caracterização do resíduo de quartzito

Análise granulométrica do quartzito foi realizada para caracterização do resíduo. Para isso, peneiras com aberturas de 4.77 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 0.60 mm, 0.30 mm e 0.15 mm foram utilizadas, conforme a NBR 7211 (ABNT 2009), para agregados e concretos.

Na determinação da composição química do quartzito, o material foi passado em peneira de nylon com abertura de 150 μm para proceder a prensagem de 3 repetições em prensa hidráulica, modelo Vulcan, marca Fluxana, a 10 toneladas por cm^2 . As amostras foram levadas para determinação dos elementos químicos em um equipamento de Fluorescência de Raios X com Dispersão de Ondas (WDXRF) da marca Bruker, modelo S8 Tiger.

2.3 Caracterização do material lignocelulósico

As partículas *in natura* de *Hevea brasiliensis* foram caracterizadas quanto aos teores de Extrativos: Tappi T 204 om-97 (Tappi 2007); Lignina: Tappi T 222 om-02 (Tappi 2002a); Holocelulose (celulose + hemiceluloses): Browning (1963); Celulose: Kennedy et al. (1987); Hemiceluloses: (holocelulose – celulose); e Cinzas: Tappi T 211 om-02 (Tappi 2002b). Os valores médios para todas as análises foram obtidos em triplicata.

2.4 Mineralização do material lignocelulósico

As partículas de madeira foram mineralizadas usando solução de sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ na concentração de 9%. As partículas foram agitadas em betoneira e a solução de sulfato de alumínio foi borrifada sobre o material. Posteriormente, as partículas ficaram em repouso durante 15 min para que ocorresse a mineralização (Balciunas et al. 2015; Pantawee et al. 2017).

2.5 Produção dos painéis cimento-madeira

Para produção dos painéis foi utilizado como aglomerante o cimento Portland CPV-ARI (alta resistência inicial), com composição química de 78.7% Ca, 6.7% sílica (Si), 3.9% ferro (Fe) e 4.7% enxofre (S). O aditivo químico utilizado foi o cloreto de cálcio (CaCl_2), para redução do tempo total de pega e endurecimento da mistura. Utilizaram-se partículas de madeira tratadas com sulfato de alumínio na concentração de 9%. Os materiais para produção dos painéis foram misturados em uma betoneira, seguindo a metodologia aplicada por Souza et al. 2021. As variáveis utilizadas para a produção dos painéis podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 Variáveis para produção dos painéis cimento-madeira.

Parâmetros	Valores
Relação madeira:cimento	1:2.75

Relação água:cimento	1:2.5
Aditivo	4%
Densidade nominal do painel	1.25 g/cm ³

O resíduo de mineração (quartzito) foi utilizado para substituir parcialmente a quantidade de cimento na produção dos painéis. Na Tabela 2 encontra-se o plano experimental dos painéis.

Tabela 2 Plano experimental dos painéis cimento-madeira.

Tratamento	Concentrações	
	Cimento (%)	Quartzito (%)
0	100	0
10	90	10
20	80	20
40	60	40

Após a mistura e homogeneização dos materiais em betoneira, a massa resultante da mistura para cada painel foi devidamente pesada, separada e distribuída aleatoriamente sobre chapas de alumínio untadas com óleo de baixa viscosidade para facilitar a retirada do painel após sua prensagem e grampeamento e, para padronizar as dimensões e espessura dos painéis, utilizou-se aros de ferro com aproximadamente 48.0 x 48.0 x 1.5 cm (Fig. 1).



Fig. 1 Fluxograma das etapas de produção dos painéis cimento-madeira

Os painéis foram prensados a uma pressão constante de 4.0 MPa por 10 min com uma prensa hidráulica, conforme Souza et al. (2021). Após a prensagem, os painéis permaneceram

grampeados por 24 horas em temperatura ambiente. Em seguida, os colchões foram desenhados e levados para sala climatizada com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 3\%$ por um período de 28 dias, para obtenção de secagem homogênea e cura completa do cimento. Por fim, foram obtidos corpos de prova para determinação das propriedades físico-mecânicas e microestrutural dos painéis.

2.6 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

A densidade aparente (AD), absorção de água (WA), inchamento em espessura (TS) e tração perpendicular (TP) foram conduzidos seguindo os procedimentos recomendados pela norma ASTM D-1037 (ASTM, 2012). Os ensaios de WA e TS foram realizados na condição de equilíbrio e após 2 e 24 h de imersão em água. O ensaio de flexão: módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) foram determinadas de acordo com as especificações da norma DIN-52362 (1982). Posteriormente, os dados foram confrontados com a norma de comercialização Bison Wood-Cement Board (2017) para inchamento em espessura, ligação interna, MOE e MOR.

2.7 Análise microestrutural

Após o ensaio à flexão estática, foi realizado micrografias das regiões de superfície dos painéis. Para isso, foram obtidas imagens com *zoom* de 100x por microscópio óptico de luz composto Leica DM4000B (LM) acoplado com câmera digital Moticom X – Moticom Europe CMOS com aumento de 100x.

2.8 Análise dos resultados

Na análise dos dados, empregou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado. Para verificar a influência da substituição do cimento por quartzito nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, foi realizada a comparação entre médias e/ou regressão linear com 5% de significância, utilizando 5 repetições para cada tratamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do resíduo de mineração

O elemento químico que obteve maior proporção foi o dióxido de silício (SiO_2) com porcentagem média de 37.8%. Dessa forma, pode-se confirmar a predominância de quartzo no material estudado (Tabela 3). Segundo Terra et al. (2023) a presença de altos teores de dióxido de silício em materiais cimentícios pode possibilitar melhor desempenho das

matrizes, devido às reações com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), resultante da hidratação do cimento. Dessa interação originam-se silicatos monocálcicos hidratados, que proporcionam redução no tamanho dos poros do compósito final e melhora a qualidade de cristalização do cimento, possibilitando o aumento da resistência do material.

Table 3 Chemical composition of the quartzite

Quartzite (Pereira et al. 2020)	
Chemical composition	Content (%)
Al_2O_3	1.97
SiO_2	37.80
P_2O_5	0.48
SO_3	1.30
ClO_2	0.90
ArO	0.11
K_2O	0.23
CaO	0.46
Fe_2O_3	0.18
ZrO_2	16.28
MoO_2	4.83

Nota-se ainda que foi possível encontrar proporções relevantes de dióxido de zircônio (ZrO_2) no quartzito, apresentando 16.2% da sua composição. Conforme Aboushelib et al. (2014), este componente funciona como enchimento de reforço com a intenção de melhorar a resistência à fratura dos materiais. Além disso, pequenas proporções foram encontradas de óxido de alumínio (Al_2O_3), pentóxido de fósforo (P_2O_5), óxido de enxofre (SO_3), dióxido de cloro (ClO_2), óxido de argônio (ArO), óxido de potássio (K_2O), óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (Fe_2O_3) e dióxido de molibdênio (MoO_2).

Nas análises granulométricas verifica-se a quantidade do material retido nas peneiras (Fig. 2). De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), para um material ser considerado como agregado miúdo, o mesmo deve passar pela peneira de 4.75 mm. Assim sendo, os agregados de quartzito em pó encontram-se nesta classificação. A maior porcentagem retida do quartzito foi nas peneiras de 0.15 e 0.30 mm. Os materiais estudados nesta análise possuem suas granulometrias dentro das zonas utilizáveis superiores e inferiores, possibilitando desta forma, seu uso como agregado para concreto.

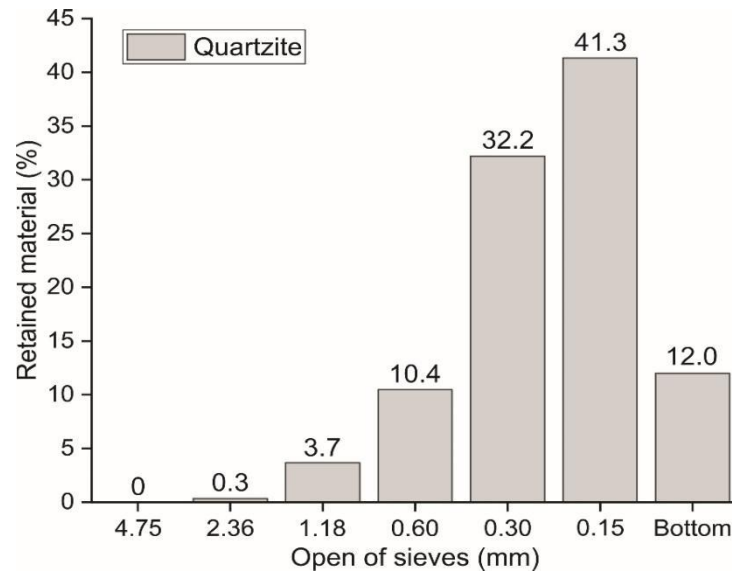


Fig. 2 Dimensões granulométricas do resíduo de mineração.

Em relação aos agregados inseridos no cimento, estudos relatam que as boas características físicos-mecânicas dos compósitos estão relacionadas com o tamanho (Philippidis et al. (2005), a forma (Asadollahi and Khazanovich 2019) e fração volumétrica dos agregados (Nogueira; Rens 2018). A adição de um agregado muito fino (≤ 1 mm) pode melhorar a rigidez do material (Saeli et al. 2019). No estudo de Saeli et al. (2019), encontrou-se maior densidade para amostras de argamassa produzidos com menor granulometria, o que significa menor porosidade no produto final.

3.2 Caracterização do material lignocelulósico

A densidade básica da madeira de *Hevea brasiliensis* (Tabela 4) foi próximo ao descrito na literatura para mesma espécie (Eufrade Júnior et al. 2015; Raia et al. 2018; Faria et al. 2021), sendo ainda semelhante as espécies do gênero *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., que são madeiras comerciais utilizadas principalmente para produção de lâminas e painéis de madeira (Matos et al. 2019; Souza et al. 2021; Villarruel et al. 2023). Segundo Lisboa et al. (2020) a densidade da madeira para produção de painéis cimento-madeira deve ser de média a baixa para assegurar a razão de compactação do painel dentro de níveis adequados para a densificação e consolidação do material. Conforme a classificação do Laboratório de Produtos Florestais (LPF 2023), a madeira de *Hevea brasiliensis* se enquadra como média densidade (entre 0.500 e 0.720 g.cm⁻³).

Tabela 4 Caracterização física e química de *Hevea brasiliensis*.

Análises	Valores médios
----------	----------------

Extrativos Totais (%)	4.3 (\pm 0.2*)
Lignina insolúvel (%)	19.7 (\pm 2.0)
Celulose (%)	59.0 (\pm 1.7)
Hemicelulose (%)	15.6 (\pm 0.8)
Cinzas (%)	1.3 (\pm 0.1)
Densidade básica (g/cm ³)	0.570 (\pm 0.002)

*Desvio padrão.

A análise química mostrou que a madeira de *Hevea brasiliensis* apresentou quantidades significativas de celulose (59.0%) e hemiceluloses com (15.6%) quando comparado a diversos materiais lignocelulósicos abordados na literatura (Souza et al. 2021; Villarruel et al. 2023). Esses constituintes das fibras naturais são importantes na utilização como reforço na produção de painéis cimento-madeira, pois eles oferecem resistência, estabilidade e rigidez dos compósitos (Sood and Dwivedi 2018). Em relação ao teor relativo de lignina (19.7%), alguns estudos mostraram que a lignina aumenta a estabilidade dimensional e reduz o caráter higroscópico do material de reforço, melhorando o seu desempenho com a matriz cimentícia (Nanko et al. 1991; Mohr et al. 2006). Outros autores relatam que o alto teor de lignina permite que a degradação ocorra mais lentamente quando expostas em meio alcalino (Hejazi et al. 2012; Fonseca et al. 2019). Isto explica o alto grau de durabilidade e resistência do material orgânico.

O componente químico mais importante para o presente estudo é a quantificação do teor de extrativos, uma vez que a presença em grandes quantidades pode afetar a cura do cimento e por consequência, afetar a interação entre a partícula de madeira e a matriz cimentícia, prejudicando a resistência dos compósitos (Almeida et al. 2013; Souza et al. 2021). No estudo de Souza et al. (2021) foi observado elevada quantidade de extrativos em fibras de coco (19.8%), sendo o principal responsável por dificultar e retardar o processo de cura do cimento e, contribuir na redução das propriedades mecânicas (MOR e MOE) dos painéis. Nesse caso, a madeira de *Hevea brasiliensis* apresentou valores de extrativos totais relativamente baixos (4.3%), o que é bastante desejável para produção deste tipo de painel.

3.3 Propriedades físicas dos painéis cimento-madeira

A densidade aparente dos painéis variou de 1.7 a 2.1 g m⁻³ (Fig. 3). Os maiores valores de densidade aparente foram obtidos no tratamento com 20% de quartzito. Apesar da variação, para a taxa de compactação que é definida pela relação entre a densidade aparente da matéria-prima e a densidade final dos painéis, não foram observadas diferenças estatísticas

entre os parâmetros avaliados. As taxas de compactação apresentaram a mesma tendência com variação de 0.7 entre o maior e o menor valor observado.

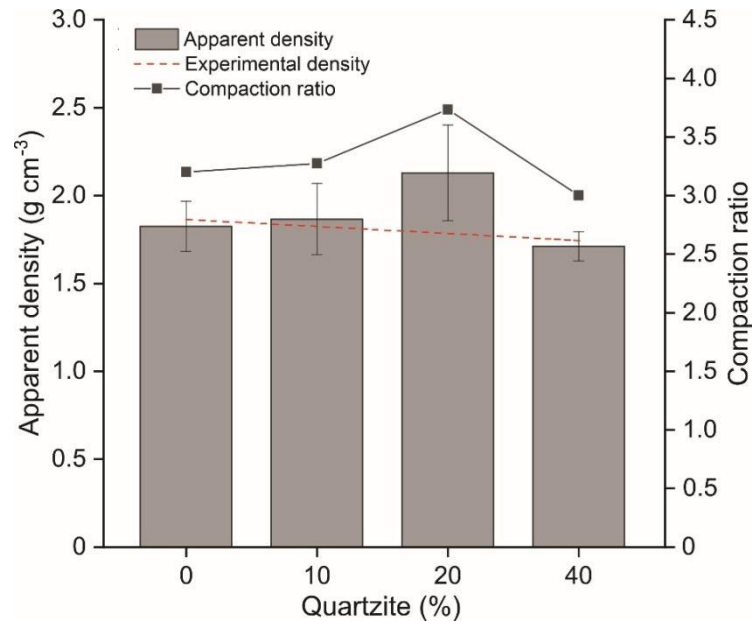


Fig. 3 Relação entre densidade aparente (AD) e taxa de compactação dos painéis cimento-madeira em função do aumento da porcentagem de quartzito.

A tendência de aumento da densidade aparente com a inserção de 20% de quartzito pode ser devido ao preenchimento dos espaços vazios dos painéis cimento-madeira durante a hidratação do cimento. Compósitos com maiores densidades aparentes tendem a ter propriedades mecânicas mais altas (Lisboa et al. 2020). Além disso, uma densidade baixa ou média da madeira utilizada, permite uma área de contato maior durante a etapa de compactação, dando origem a ligações mais fortes e aumentando as propriedades de resistência dos painéis (Castro et al. 2019). Portanto, tendo em vista esses aspectos, o material fibroso utilizado neste trabalho pode ser considerado satisfatória para o uso final proposto, uma vez que a madeira é de média densidade.

A substituição do cimento por quartzito, nos painéis cimento-madeira, reduziu a absorção de água após 2h (WA 2h) e 24h (WA 24h), conforme a Fig. 4. Para WA 2h encontrou-se menores valores com adição de 20% de quartzito (23.1%) e para WA 24h com a adição de 10% de quartzito (28.2%).

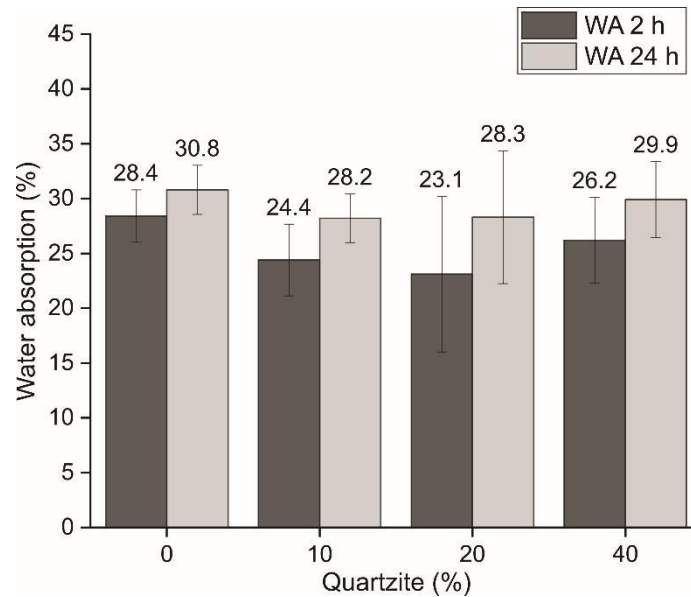


Fig. 4 Valores médios de absorção de água dos painéis cimento-madeira.

O quartzito pode ter reduzido os poros dos painéis, o que justifica a diminuição nos valores de absorção de água com a sua adição. Esses menores valores da absorção de água, também pode estar relacionada à concomitante diminuição da proporção de hidroxilas (OH-) livres, principalmente devido a região amorfa dos constituintes químicos (celulose e hemiceluloses) das fibras, capazes de adsorver água (Terra et al. 2023). No estudo de Teixeira et al. (2012) ao avaliar painéis cimento-madeira produzidos com partículas de *Hevea brasiliensis*, encontraram valores de 36.5% para WA 2h e 41.6% para WA 24h. Okino et al. (2004) para mesma espécie obtiveram valores menores de WA 2h e WA 24 h (13.6 e 16.7%, respectivamente).

Os resultados mostram também o efeito positivo dos tratamentos com $Al_2(SO_4)_3$ nos painéis cimento-madeira, principalmente na razão de absorção de água, que já vem sendo relacionado ao fato de que este tratamento de mineralização, impede a liberação de açúcar dos agregados orgânicos, contribui na redução da higroscopicidade e absorção de água, conforme relatado em diferentes estudos (Bołtryk et al. 2014; Balciunas et al. 2015; Abed et al. 2021).

Para os valores de inchamento em espessura após 2 (TS 2h) e 24h (TS 24h), foi verificado redução com a substituição do cimento por quartzito (Fig. 5). Os menores valores encontrados foram para TS 2h com 20% de quartzito (0.4%) e para TS 24h com 10% de quartzito (0.8%). A presença de quartzito nos poros dos painéis pode ter reduzido à permeabilidade, reduzindo a absorção de água (Fig. 4), e conseqüentemente reduzindo o inchamento.

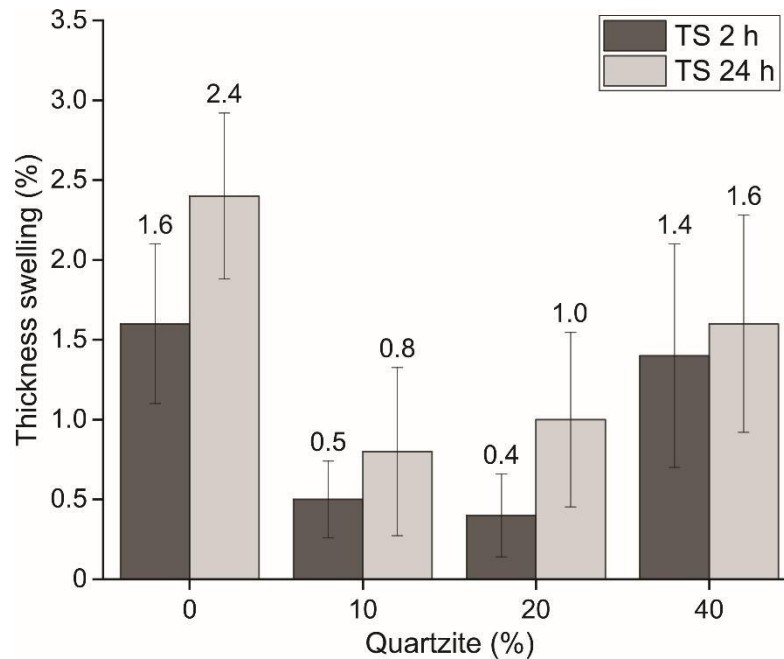


Fig. 5 Valores médios de inchamento em espessura dos painéis cimento-madeira.

De acordo com o processo Bison (2017), os painéis cimento-madeira devem apresentar valores de TS 2h inferiores a 1.0% e TS 24h inferiores a 1.5%. Neste estudo os painéis com 10 e 20% de quartzito atenderam pela classificação recomendado pelo processo. No estudo de Iwakiri et al. (2017) encontraram valores próximos ao do presente estudo para painéis cimento-madeira utilizando partículas de *Hevea brasiliensis*, com 0.6 e 1.1% para TS 2h e TS 24h, respectivamente.

Analisando separadamente a absorção de água e o inchamento em espessura quando se adicionam porcentagens de 40% de quartzito, houve uma diminuição na absorção de água e concomitante aumento no inchamento em espessura. Este fato pode estar relacionado com a diminuição da homogeneidade de dispersão entre o quartzito e fibras nos painéis. Em maiores quantidades de quartzito, podem se enredar resultando em pequenas galerias entre as fibras e a matriz cimentícia.

3.4 Propriedades mecânicas dos painéis cimento-madeira

Os painéis com 0, 10 e 20% de quartzito apresentaram valores de ligação interna equiparado (Fig. 6). O painel com 40% de quartzito apresentou redução no valor médio de ligação interna em torno de 37% (0.22 MPa) em relação ao painel sem quartzito.

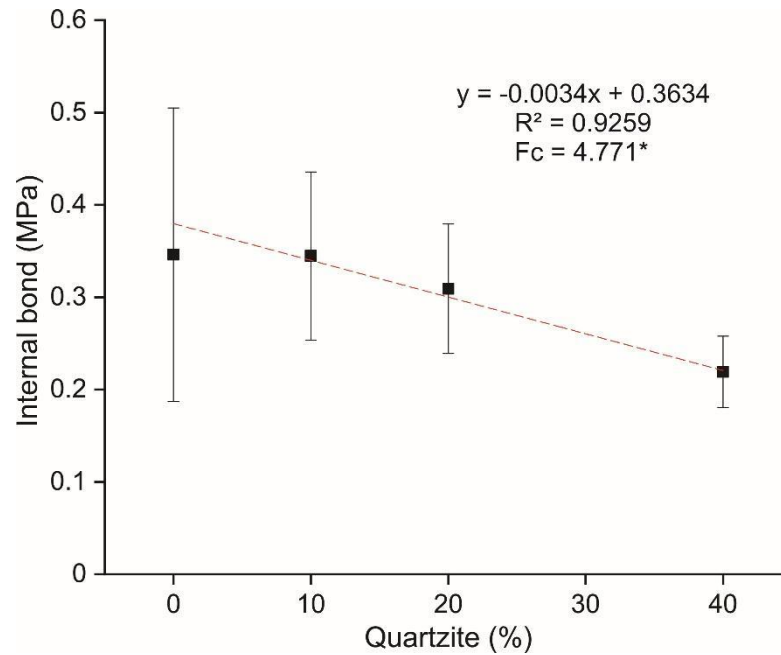


Fig. 6 Valores médios de ligação interna dos painéis cimento-madeira

Os valores encontrados são superiores aos verificados por Teixeira et al. (2012) para painéis de cimento-madeira utilizando partículas de *Hevea brasiliensis*, obtendo valores médios de ligação interna de 0.01 MPa. Esses mesmos autores abordam que a madeira de *Hevea brasiliensis* pode ser problemática para produção de painéis de cimento-madeira, devido a sua quantidade de açúcares e de gomas livres (na faixa de 1.0 a 2.3% e 7.5 a 10.1%, respectivamente), causando incompatibilidade com o cimento. No entanto, o tratamento das partículas de *Hevea brasiliensis* com sulfato de alumínio pode ter melhorado a interação com o cimento-quartzito, uma vez que o tratamento com $Al_2(SO_4)_3$ reduz a incompatibilidade química das reações de pega dos materiais inorgânicos com as fibras. Apesar disso, a colagem interna não atingiu os requisitos estabelecidos pelo processo Bison (2017), pois o valor mínimo aceitável para painéis estruturais é de 0.40 MPa.

Com relação aos resultados do Módulo de elasticidade (MOE) e do Módulo de ruptura (MOR), os painéis madeira-cimento apresentaram diferença significativa para esses parâmetros com o aumento do percentual de quartzito, conforme Fig. 7.

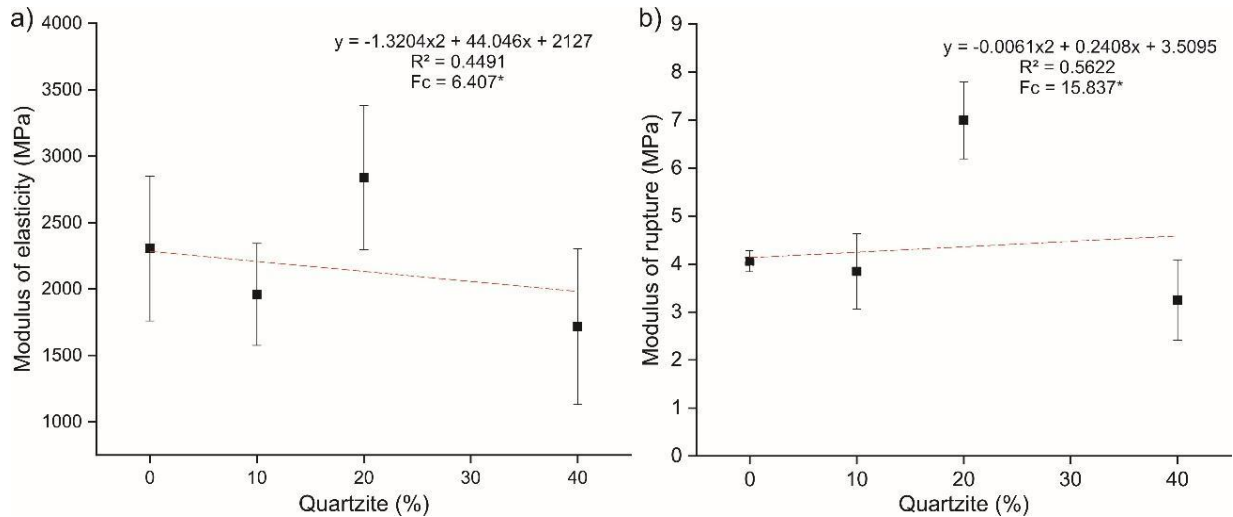


Fig. 7 Flexão estática de painéis cimento-madeira: a) Módulo de elasticidade e b) Módulo de ruptura.

Os painéis com 20% de quartzito apresentaram aumento nos valores de MOE (2837.3 MPa) e MOR (7,0 MPa), sendo superiores aos verificados por Iwakiri et al. (2017) para painéis cimento-madeira utilizando fibras de *Hevea brasiliensis* (2101 MPa e 3.9 MPa para MOE e MOR, respectivamente). Souza et al. (2021) utilizando fibras de coco como reforço em painéis cimentícios, obtiveram valores relativamente baixos para MOR (<1000 Mpa) e MOE (> 2.5 Mpa). Esse aumento nos valores de MOE e MOR pode ser associado a influência do tratamento com $Al_2(SO_4)_3$ que favoreceu a aderência das fibras com o cimento-quartzito.

Apesar desses valores significativos, quando comparado com a literatura, as propriedades mecânicas não foram satisfatórias, embora o tratamento com 20% de quartzito tenha apresentado valores superiores aos demais. Conforme o processo de Bison (2017), o valor mínimo de 9.0 MPa para o MOR e de 3000 MPa para MOE. Desse modo, nenhum dos tratamentos estudados atendeu a norma de comercialização para MOR e MOE. Contudo, a densidade dos materiais empregados pode ser considerado um personagem secundário nesta questão, além de diversas características como porosidade, tamanho e formato dos materiais, que podem ter sido motivo para ocorrência da segregação e heterogeneidade em áreas dos painéis.

Na Fig. 8a observa-se a presença de microfissuras, que pode ter influenciado de forma negativa no comportamento mecânico dos painéis. Nas Fig. 8b, c e d, verifica-se a presença de espaços vazios. Pode-se observar ainda na Fig. 8c a presença de fibras de *Hevea brasiliensis* reforçando o cimento-quartzito.

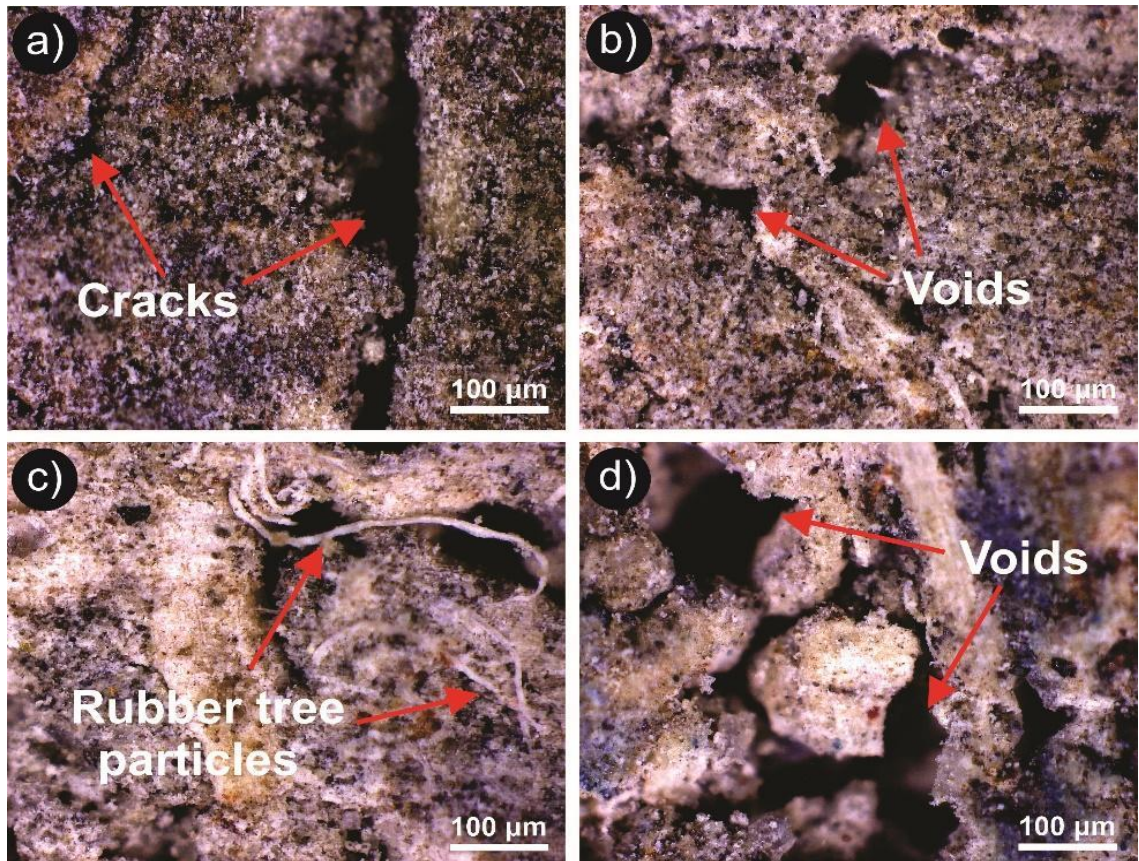


Fig. 8 Imagens de microscopia de luz da superfície dos painéis cimento madeira: a) 0% de quartzito; b) 10% de quartzito; c) 20% de quartzito e d) 40% de quartzito.

A elevada quantidade de quartzito (40%) não foi adequada para aumentar a resistência a flexão dos painéis e propiciar um reforço mais eficiente para a matriz cimentícia. Além disso, pode ter ocorrido despadronização na distribuição do material, juntamente com as fibras mineralizadas com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ dentro da matriz, sendo que estas podem ter sido mantidas aglomeradas ou não dispersaram adequadamente durante a mistura e formação dos painéis. O mesmo comportamento foi relatado por Terra et al. (2023) para blocos de concreto utilizando acima de 25% de quartzito com 2.5% de fibras de coco como reforço.

Segundo Araújo and Sobrinho (2016), o quartzito reage com os álcalis presentes no cimento, formando aspectos de gel típicos da reação álcali-silicato ou álcali-agregado, que pode gerar maior retração inicial do compósito. Portanto, a diminuição da resistência mecânica dos painéis cimento-madeira pode estar relacionada com a maior quantidade de fissuras e/ou trincas contidas no interior dos painéis, que elevam a quantidade de espaços vazios nos compósitos, sendo necessários novos estudos com intuito de avaliar métodos alternativos de substituição.

4. CONCLUSÃO

O quartzito proporcionou características importantes para os painéis cimento-madeira devido ao alto percentual de dióxido de sílica, podendo contribuir com a durabilidade e vida útil do seu produto final. O tratamento com $Al_2(SO_4)_3$ melhorou a aderência da partícula de *Hevea brasiliensis* com cimento-quartzito.

Os painéis com 20% de quartzito em substituição ao cimento contribuíram no aumento da densidade aparente e taxa de compactação e, redução de absorção de água e inchamento em espessura dos painéis. Nas propriedades mecânicas, não foi verificada melhoria na propriedade de ligação interna. No entanto, apresentaram aumento significativo no MOE e MOR. Em seguida, os painéis foram classificados como impróprios para usos estruturais, sendo adequado para usos internos.

Dessa forma, essa pesquisa apresenta um traço alternativo para produção de painéis cimento-madeira que visa valorizar resíduos e fomentar a sustentabilidade do setor da construção civil, além de trazer alternativas viáveis para melhorar algumas propriedades nas construções que utilizam esses tipos painéis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradecemos também ao Núcleo de Estudos em Nanotecnologia Florestal (NENF), ao Núcleo de Estudos em Painéis de Madeira (NEPAM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT) e ao Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras, pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- Abed MJ, Khaleel OR, Fayyadh MM (2021) Effect of aluminium sulphate $Al_2(SO_4)_3$ treatment on paper waste as a fine aggregate partial replacement in lightweight cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 42:1152-1159. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.529>
- ABNT - NBR 7211 (2009) Aggregates for concrete - Specification. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro, Brazil.
- Aboushelib MN, Sleem D (2014) Microtensile bond strength of lithium disilicate ceramics to resin adhesives. *J Adhes Dent* 16(6):547-52. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a33249>

Almeida AEFDS, Tonoli GHD, Santos SFD, Savastano Jr H (2013) Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement and Concrete Composites* 42:49-58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001>

Altoé TP, Vidal FWH (2017) Aproveitamento de resíduos oriundos da lavra de quartzito ornamental. VI Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CTEM, p. 200-206, 2017.

Andre A, Brito J, Rosa A, Pedro D (2014) Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. *Journal of Cleaner Production* 65, 389-396. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.037>

Andreola F, Barbieri L, Lancellotti I, Leonelli C, Manfredini T (2016) Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. *Ceramics International* 42(12):13333-13338. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.205>

Araújo DT, Sobrinho CWAP (2016) Blocos de Fundações de Edifícios Afetados por Reação Alcalis-Agregado-RAA: Estudo de Caso. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada* 1. <https://doi.org/10.25286/rep.v1i1.68>

Asadollahi A, Khazanovich L (2019) Numerical investigation of the effect of heterogeneity on the attenuation of shear waves in concrete. *Ultrasonics* 91:34-44. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.011>

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM: D-1037 (2012) Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles. Materials Philadelphia.

Balčiūnas G, Pundienė I, Lekūnaitė-Lukošiūnė L, Vėjelis S, Korjakins A (2015) Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical–mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. *Industrial Crops and Products* 77:724-734. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.011>

Bołtryk M, Pawluczuk E (2014) Properties of a lightweight cement composite with an ecological organic filler. *Construction and Building Materials* 51:97-105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.065>

Bahadori A, Smith ST (2016) Dictionary of environmental engineering and wastewater treatment. Springer.

BISON. Bison Wood-Cement Board (2017) Technical hand book. Bison Report. Berlin, 1-36.

Bołtryk M, Pawluczuk E (2014) Properties of a lightweight cement composite with an ecological organic filler. *Construction and Building Materials* 51:97-105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.065>

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

Castro VGD, Azambuja RDR, Parchen CFA, Iwakiri S (2019) Alternative vibro-dynamic compression processing of wood-cement composites using Amazonian wood. *Acta Amazonica* 49:75-80. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201800192>

Çavdar AD, Yel H, Torun SB (2022) Microcrystalline cellulose addition effects on the properties of wood cement boards. *Journal of Building Engineering* 48, 103975. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103975>

Courard L, Trevino M, Bissonnette B (2011) Condition evaluation of the existing structure prior to overlay. In *Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 193-RLS* (pp. 17-50). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1239-3_3

Eufrade Junior HJ, Ohto, JM, Silva, LL, Lara Palma HA, Ballarin AW (2015) Potential of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) for structural use after the period of latex extraction: A case study in Brazil. *Journal of Wood Science* 61:384-390. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1478-7>

Faria DL, Eugênio TMC, Lopes DE, Protásio TDP, Mendes LM, Guimarães Junior JB (2021) Particleboards produced with different proportions of *Hevea brasiliensis*: Residual wood valorization in higher value added products. *Ciência e Agrotecnologia*, 45. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145021420>

Ferraz JM, Del Menezzi CH, Souza MR, Okino EY, Martins SA (2012) Compatibility of pretreated coir fibres (*Cocos nucifera* L.) with Portland cement to produce mineral composites. *International Journal of Polymer Science* 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/290571>

Fonseca CS, Silva MF, Mendes RF, Hein PRG, Zangiaco AL, Savastano Jr H, Tonoli GHD (2019) Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 211:517-527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.236>

Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush AA (2012) simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, *Construction and Building Materials* 30:100-116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>

Iwakiri S, Trianoski R, Weber AM, Bonfatti Jr EA, Pereira GF, Bueno JA, Cechin L, Raia, RZ (2017) Efeitos do tratamento de partículas e aceleradores de endurecimento na produção de painéis cimento-madeira de *Hevea brasiliensis*. *Floresta*, 47(3). <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i3.51636>

Júnior CMD, Barros SVA, Neves GA (2018) Utilização de Resíduos de Quartzito para Aplicação em Pavimentos Intertravados. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos* 13(3):1-5.

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

LPF. Laboratório de Produtos Florestais (2023) Sistema Nacional de Informações Florestais. Serviço Florestal Brasileiro. Database of brazilian woods. Brasília. <https://snif.florestal.gov.br/>. 14 mai. 2023.

Lisboa FJN, Scatolino MV, Paula Protásio T, Júnior JBG, Marconcini JM, Mendes LM (2020) Lignocellulosic materials for production of cement composites: Valorization of the

alkali treated soybean pod and eucalyptus wood particles to obtain higher value-added products. *Waste and Biomass Valorization* 11:2235-2245. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0488-2>

Ma LF, Yamauchi H, Pulido OR, Tamura Y, Sasaki H, Kawai S (2002) Manufacture of Cement-bonded Boards from Wood and Other Lignocellulosic Materials: Relationships between Cement Hydration and Mechanical Properties of Cement-bonded Boards. In *ACIAR proceedings* (pp. 13-23).

Małaszkiwicz D, Bołtryk M (2008) Optimisation of composition of lightweight concrete with organic filler in the form of *Phragmites australis* reed. Role for concrete in global development. In *Proceedings of the international conference, Dundee, Scotland, UK* (pp. 481-490).

Matos AC, Guimarães Júnior JB, Borges CC, Matos LC, Ferreira JC, Mendes LM (2019) Influência de diferentes composições de lâminas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby e *Pinus oocarpa* var. *oocarpa* (Schiede ex Schldtl) para produção de compensados multilaminados. *Scientia Forestalis* 47(124):799-810. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n124.21>

Mohr BJ, Biernacki JJ, Kurtis KE (2006) Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber–cement composites. *Cement and Concrete Research*. 36:1240–1251. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.020>

Nanko H, Asano S, Ohsawa J (1991) Shrinkage behavior of pulp fibers during drying. In: *Proceedings of the first Tappi International Paper Physics Conference, Kona* 365–374.

Nogueira CL, Rens KL (2018) Ultrasonic wave propagation in EPS lightweight concrete and effective elastic properties. *Construction and Building Materials* 184:634-642. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.026>

DIN. Normen für Holzfaserplatten Spanplatten Sperrholz. DIN 52362 (1982) Testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin 39-40

Okino EYA, Souza MRD, Santana MAE, Sousa MED, Teixeira DE (2004) Chapa aglomerada de cimento-madeira de *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. *Revista Árvore* 28:451-457. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622004000300016>

PANTAWEE, S.; SINSIRI, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate $[Al_2(SO_4)_3]$ and hydrated lime $[Ca(OH)_2]$ treatment. *Construction and Building Materials*, n. 156, p. 435-442, 2017.

Pereira TGT, Silva DW, Eugênio TMC, Scatolino MV, Carvalho Terra IC, Fonseca CS, Bufalino L, Mendes RF, Mendes LM (2020) Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. *Materials Today: Proceedings* 31:309-314. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.394>

Philippidis TP, Aggelis DG (2005) Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete *Ultrasonics* 43:584-595. <https://10.1016/j.ultras.2004.12.001>.

- Raia RZ, Iwakiri S, Trianoski R, Andrade AS, Junior EAB (2018) Influência da extração de látex nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Hevea brasiliensis*. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science) 9(3):152-159. <https://10.12953/2177-6830/rcm.v9n3p152-159>
- Ramos LMA, Latorraca JVDF, Castor Neto, TC, Martins LS, Severo ETD (2016) Anatomical characterization of tension wood in *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Mull. Arg. Revista Árvore 40(6):1099-1107. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000600016>
- Saeli M, Senff L, Tobaldi DM, Seabra MP, Labrincha JA (2019) Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: Influence of granulometry and binder/aggregate ratio. Construction and Building Materials 227:116643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.024>.
- Sarmiento CR, Freire WJ (1997) Argamassa de cimento e areia combinada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. Engenharia Agrícola 17(2):1-8.
- Schackow A, Stringari D, Senff L, Correia SL, Segadães AM (2015) Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. Cement and concrete composites 62, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019>
- Silva AG, Costa E, Binotti, FFS, Júnior EJS (2018) A profundidade da semeadura afeta a velocidade da emergência de *Hevea brasiliensis*. Revista Ciência Agrícola 16(3):51-55. <https://doi.org/10.28998/rca.v16i3.4146>
- Sood M, Dwivedi G (2018) Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. Egyptian journal of petroleum 27:775-783. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005>
- Souza MJC, Melo RR, Guimarães Junior JB, Carnaval TKBDA, Pimenta AS, Mascarenhas ARP (2021) Wood–cement boards with addition of coconut husk. Wood Material Science & Engineering 17:1-10. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1914722>
- TAPPI Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1997). T 204 om-97 solvent extractives of wood and pulp.
- TAPPI Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002a). T 222 om-02 acid-insoluble lignin in wood pulp.
- TAPPI Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002b). T 211 om-02 Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C.
- Teixeira DE, Alves MVDS, Costa AFD, Sousa NGD (2012) Características de chapas de cimento-madeira com partículas de seringueira (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) tratadas com CCA. Floresta e Ambiente 8:18-26.
- Terra ICDC, Batista FG, Silva DW, Scatolino MV, Alves Júnior FT, Martins MA, Mendes LM (2023) Mining waste and coconut fibers as an eco-friendly reinforcement for the production of concrete blocks. Environmental Science and Pollution Research 30:62641–62652. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26493-5>

Vazzoler JS, Vieira GL, Teles CR, Degen MK, Teixeira RA (2018) Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. *Construction and Building Materials* 177:314-321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.098>

Villarruel DCV, Novais Miranda, EH, Gomes DAC, Furtini ACC, Santos CA, Mendes LM, Guimarães Júnior JB (2023) Evaluation of the addition of wheat residues in the production of *Pinus oocarpa* agglomerated panels. *Clean Technologies and Environmental Policy* 1-8. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02467-6>