



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

MARIA FERNANDA FELIPPE SILVA

**Análise do desempenho físico-mecânico e índice de inibição de compósitos
cimento-madeira com adição de cinzas de biomassa**

Itapeva - SP
2023

MARIA FERNANDA FELIPPE SILVA

**Análise do desempenho físico-mecânico e índice de inibição de compósito
cimento-madeira com adição de cinzas de biomassa**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Câmpus de Itapeva, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Industrial - Madeira.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Cristiane Inácio de Campos

Itapeva - SP
2023

S586a	Silva, Maria Fernanda Felipe Análise do desempenho físico-mecânico e índice de inibição de compósito cimento-madeira com adição de cinzas de biomassa / Maria Fernanda Felipe Silva. -- Itapeva, 2023 55 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva Orientadora: Cristiane Inácio de Campos 1. Compósito cimentício. 2. Propriedades físicas. 3. Propriedades mecânicas. 4. Aproveitamento de resíduos. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARIA FERNANDA FELIPPE SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO E ÍNDICE DE
INIBIÇÃO DE COMPÓSITO CIMENTO-MADEIRA COM ADIÇÃO DE
CINZAS DE BIOMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP -
Campus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof.^a Associada Cristiane Inácio de Campos
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Itapeva.



2º Examinador: Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Itapeva.

3º Examinador: Eng. Murilo Augusto Veríssimo Leite
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Itapeva.



Itapeva, 16/05/2023.

À minha família por todo o apoio e amor
durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade de trilhar o meu caminho com saúde e perseverança.

Aos meus pais Orival Silva Junior e Adriana Silvia Felipe Silva (*in memoriam*), por sempre me apoiarem e incentivarem a ser uma pessoa melhor a cada dia, sendo exemplos a serem seguidos.

Ao meu irmão João Vítor Felipe Silva, por ser uma inspiração e deixar a minha caminhada mais leve com suas brincadeiras.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Cristiane Inácio de Campos, pela amizade durante todos os meus anos na vida acadêmica e auxílio na realização do trabalho.

Aos técnicos de laboratório Waldecir de Araújo, José Cecílio Rodrigues e Eliel Marques Silva pela confecção dos moldes, e Alex Siqueira Costa e Tiago Matos Andres, pelo auxílio na realização dos ensaios mecânicos.

Ao Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza, pelo suporte técnico-científico na aquisição de dados para a determinação do índice de inibição.

À coordenação executiva do Instituto de Ciências e Engenharia – UNESP de Itapeva, por permitir o uso dos laboratórios e equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de iniciação científica, de 01/11/2022 a 31/10/2023, sob o processo nº 2022/09869-9.

Obs.: As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

"Por vezes sentimos que aquilo que
fazemos não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma
gota"

(Madre Teresa de Calcutá).

RESUMO

O estudo de materiais compósitos tem crescido nas últimas décadas, tendo em vista a possibilidade de desenvolver novos materiais com uso de matérias-primas alternativas além de agregar valor a resíduos gerados nos mais diferentes segmentos industriais. Nesse contexto, pode-se destacar os compósitos cimentícios com grande aplicação na construção civil. Embora a construção civil no Brasil tenha como material base o cimento, sabe-se que o mesmo provém de fonte não renovável. No entanto, estudos já indicaram a viabilidade de inserir cinza de biomassa em compósitos cimentícios. O objetivo do presente trabalho foi avaliar as propriedades físico-mecânicas e o índice de inibição dos compósitos cimento-madeira produzidos com CPV ARI e partículas de *Eucalyptus grandis* com substituição parcial do cimento por cinzas de biomassa em 5 diferentes teores (5, 10, 15, 20 e 25%). Os compósitos foram produzidos e caracterizados conforme as normas ABNT NBR 7215 (2019) e ASTM E1876 (2022). Ao final dos ensaios foi realizada a análise estatística através da ANOVA e teste de Tukey para verificar a diferença estatística entre as médias, ao nível de 5% de significância, e a análise de regressão para verificar a correlação entre as propriedades e o teor de cinzas. Os compósitos foram classificados como de baixa inibição, porém não foi observada correlação entre o índice de inibição e o teor de cinzas. A densidade e a resistência e rigidez na compressão normal reduziram com o aumento do teor de substituição do cimento, a absorção de água aumentou e não houve variação do inchamento em espessura. A substituição parcial de cimento por cinzas de biomassa em compósitos cimento-madeira apresenta potencial, em especial, com substituição de 5% por apresentar melhores propriedades físico-mecânicas.

Palavras-chave: Compósito cimentício; Propriedades físicas; Propriedades mecânicas; Aproveitamento de resíduos.

ABSTRACT

The study of composite materials has grown recently, with the different possibilities of development of new materials using alternative raw materials such as residues produced in several industrial segments. Cementitious composites are largely applied in construction; however, it comes from a non-renewable source. Studies have shown the feasibility of adding biomass ash in cementitious composites. The aim of this work was to evaluate the physical-mechanical properties and inhibition index of wood-cement composites produced with CPV ARI and *Eucalyptus grandis* wood particles with partial replacement of cement by biomass ash at 5 different contents (5%, 10%, 15%, 20% and 25%). The composites were produced and tested according to ABNT NBR 7215 (2019) and ASTM E1876 (2022). Statistical analysis were performed using ANOVA and Tukey's test to verify the statistical difference between the averages, at a 5% significance level, and regression analysis to verify the correlation between properties and ash content. The composites can be classified as low inhibition mixtures, but it was not possible to conclude the relation between the inhibition index and the ash content. Density and mechanical properties reduced with increasing ash replacement content, water absorption increased and there was no change in thickness swelling. The partial replacement of cement by biomass ashes in cement-wood composites has potential; in particular, the treatment with 5% replacement, as it presents better physical-mechanical performance.

Keywords: Cementitious composite; Physical properties; Mechanical properties; Residues use.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processamento das partículas de madeira, sendo (A) picador de tambor e (B) moinho tipo Wiley	22
Figura 2 - Preparação das partículas de madeira, sendo (A) jogo de peneiras vibratórias e (B) secagem em estufa	23
Figura 3 - Cimento, cinzas e madeira misturados antes da adição de água para produção do compósito	24
Figura 4 - Moldes utilizados para a produção do compósito	25
Figura 5 - Corpos de prova após o desmolde	25
Figura 6 - Aquisição dos valores de temperatura e tempo dos compósitos	27
Figura 7 - Realização do ensaio de densidade aparente, sendo (A) pesagem em balança semianalítica e (B) medição com paquímetro digital	28
Figura 8 - Realização dos ensaios de inchamento em espessura e absorção de água, sendo (A) medição da espessura e (B) pesagem do corpo de prova	29
Figura 9 - Imersão dos corpos de prova em água	29
Figura 10 - Realização do ensaio não destrutivo pelo sistema SONELASTIC®	31
Figura 11 - Realização do ensaio de resistência à compressão normal.....	32
Gráfico 1 - Variação da temperatura ao longo do período de cura	35
Gráfico 2 - Densidade em função do teor de cinzas	37
Gráfico 3 - Inchamento em espessura em função do teor de cinzas	38
Gráfico 4 - Absorção de água em função do teor de cinzas	40
Gráfico 5 - Módulo de elasticidade dinâmico em função do teor de cinzas	42
Gráfico 6 - Módulo de elasticidade estático em função do teor de cinzas	43
Gráfico 7 - Resistência à compressão normal em função do teor de cinzas	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química das cinzas	21
Tabela 2 – Relação dos tratamentos produzidos.....	23
Tabela 3 – Resultados do ensaio de índice de inibição.....	34
Tabela 4 – Resultados do ensaio de densidade aparente	36
Tabela 5 – Resultados do ensaio de inchamento em espessura 24 horas	38
Tabela 6 – Resultados do ensaio de absorção de água 24 horas	39
Tabela 7 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico	41
Tabela 8 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático	43
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão normal aos 28 dias	44
Tabela 10 – Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e as demais propriedades mecânicas	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP V ARI	Cimento Portland V de Alta Resistência Inicial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Compósitos	15
3.2	Compósitos cimento-madeira	16
3.3	Biomassa florestal e cinzas	17
3.4	Compósitos cimentícios com cinzas	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	Preparação da matéria-prima	21
4.2	Produção dos compósitos	23
4.3	Determinação do índice de inibição	26
4.4	Determinação da densidade aparente	27
4.5	Determinação do inchamento em espessura e absorção de água 24h	28
4.6	Determinação do módulo de elasticidade dinâmico	30
4.7	Determinação do módulo de elasticidade estático e resistência à compressão normal aos 28 dias	32
4.8	Análise estatística	33
5	RESULTADOS	34
5.1	Índice de inibição	34
5.2	Densidade aparente	36
5.3	Inchamento em espessura e absorção de água 24 horas	37
5.4	Módulo de elasticidade dinâmico	41
5.5	Módulo de elasticidade estático e resistência à compressão normal aos 28 dias	42
6	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O compósito cimento-madeira é um material composto por uma mistura de partículas de madeira, cimento e água. Nesta combinação o cimento contribui com o aumento da durabilidade, resistência ao fogo e estabilidade dimensional. Enquanto, a madeira proporciona maior trabalhabilidade e melhores propriedades termo acústicas, além de reduzir o impacto ambiental, podendo ser utilizados resíduos da indústria madeireira.

O compósito, dependendo da combinação de materiais, pode apresentar baixa densidade, alta estabilidade dimensional, boas propriedades acústicas e térmicas e alta resistência mecânica, o que o torna uma opção interessante para construções sustentáveis, sendo amplamente utilizado como forros e revestimentos de paredes e aplicações estruturais em pisos e paredes.

No entanto, a produção de cimento é altamente poluente e utiliza recursos não renováveis. Por isso, se torna interessante a substituição parcial do cimento no compósito por cinzas de biomassa, proveniente de fontes renováveis.

As cinzas são um subproduto da queima de materiais orgânicos, como carvão e madeira, e possuem propriedades análogas aos materiais cimentícios que podem ser utilizadas para manter ou até aumentar a resistência à compressão e flexão, diminuir a absorção de água, aumentar a compatibilidade entre o cimento e a madeira e garantir durabilidade ao compósito.

A utilização de cinzas na produção de cimento-madeira também pode trazer benefícios ambientais, uma vez que o material é produzido a partir de subprodutos e resíduos que poderiam ser descartados.

Assim, o uso de cinzas na produção de cimento-madeira pode ser uma alternativa sustentável e viável para materiais empregados na construção civil, trazendo benefícios tanto do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista da resistência e durabilidade do material.

Dado o exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar as propriedades físico-mecânicas e índice de inibição de compósitos cimento-madeira com adição de cinzas de biomassa.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar as propriedades físico-mecânicas e o índice de inibição de compósitos cimento-madeira produzidos com cimento Portland CP V ARI e *Eucalyptus grandis* com substituição parcial do cimento por cinzas de biomassa em 5 diferentes teores (5%, 10%, 15%, 20% e 25%).

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar as propriedades físicas de densidade, inchamento em espessura 24 horas e absorção de água 24 horas nos compósitos e comparar com o tratamento sem adição de cinzas.
- Avaliar as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade dinâmico pelo método não destrutivo, módulo de elasticidade estático e módulo de resistência à compressão normal aos 28 dias e comparar com o tratamento sem adição de cinzas.
- Comparar o índice de inibição dos compósitos com o tratamento sem adição de cinzas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A seção a seguir apresenta a revisão bibliográfica sobre os compósitos, compósitos cimento-madeira, a biomassa florestal e cinzas e os compósitos cimentícios com cinzas.

3.1 Compósitos

A norma D3878 da American Society for Testing and Materials - ASTM (2020) explica compósitos como uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que, combinados, formam um material com características não encontradas nos materiais isoladamente.

De acordo com a definição da IUPAC (2019), compósito é um material multicomponente com múltiplas fases não gasosas, onde pelo menos uma delas é contínua. A fase descontínua constitui o material de reforço, que pode ser particulado ou fibroso. Grande parte das propriedades dos compósitos está relacionada com a interface entre a matriz e o reforço.

Hashin (1983) define compósitos como a junção de um ou mais materiais que, geralmente, estão fortemente ligados na sua interface. Muitos materiais se enquadram nesse conceito como borracha reforçada, argamassas e concreto.

A formação de materiais compósitos tem como principais componentes matrizes e reforços (HSISSOU *et al.*, 2021). De acordo com Germano (2022), a matriz age na aglomeração do material e distribuição de tensões, enquanto o reforço atua como agregado à matriz.

Devido as suas propriedades físico-mecânicas, os materiais compósitos estão sendo amplamente difundidos em vários campos da engenharia como a civil, mecânica e aeroespacial, além da biomedicina (MONALDO; NERILLI; VAIRO, 2019).

Por sua vez, os compósitos reforçados com fibras naturais são uma alternativa vantajosa aos demais compósitos e menos agressivos ao meio ambiente, por advir de recursos renováveis, além de que as fibras auxiliam no controle de rachaduras e aumento da tenacidade e durabilidade (KESIKIDOU; STEFANIDOU, 2019).

De acordo com Kerni *et al.* (2020), as fibras naturais são divididas em seis categorias: fibras de caule, que incluem arroz, milho e trigo; fibras foliares de folhas de abacá, sisal e abacaxi; fibras liberianas como coco e linho; fibras de sementes

como algodão e sumaúma; fibras de núcleo como juta e cânhamo e outros tipos que incluem madeiras e raízes.

3.2 Compósitos cimento-madeira

Os compósitos cimento-madeira combinam partículas de madeira com o aglomerante mineral. Iwakiri *et al.* (2012) comparam este material com os painéis de madeira aglomerada, mas, ao invés de utilizar-se resinas, é utilizado o aglomerante mineral e o processo de endurecimento ocorre devido reações exotérmicas advindas da hidratação do cimento.

De acordo com Iwakiri *et al.* (2015), este material é amplamente utilizado na construção civil, como em forros e revestimentos de paredes. Rocha *et al.* (2022) complementam que os compósitos reforçados com fibras possuem boa aceitação em aplicações estruturais.

No compósito, a madeira proporciona maior resistência a ruptura, enquanto o cimento aumenta a durabilidade, estabilidade dimensional e resistência ao fogo (STOKKE; WU; HAN, 2013). Villas-Bôas *et al.* (2017) destacam que as outras vantagens do compósito cimento-madeira são a baixa densidade em relação as placas cimentícias tradicionais, resistência a agentes xilófagos e intempéries e boas propriedades acústicas e térmicas.

Outra vantagem é a possibilidade de uso de resíduos da indústria madeireira, agregando valor e reduzindo o impacto ambiental (MACÊDO; COSTA E SOUZA; POMPEU NETO, 2012).

De acordo com Castro, Parchen e Iwakiri (2019), as primeiras indústrias de cimento-madeira surgiram na década de 1930, porém o seu maior desenvolvimento ocorreu no final dos anos 1940.

A produção em larga escala de chapas cimento-madeira iniciou em 1976, na Alemanha. E atualmente são muito utilizados no Japão, Rússia, Estados Unidos e México (MARCHESAN *et al.*, 2022).

Este material ainda não é amplamente utilizado no Brasil, principalmente por questões culturais, porém apresenta potencial devido a grande disponibilidade de resíduos madeireiros e a auto-suficiência em cimento (IWAKIRI; PRATA., 2008).

Quando comparado compósitos cimento-madeira com madeira de *Pinus* e de *Eucalyptus*, as partículas de eucalipto apresentaram desempenho físico superior em

relação as madeiras de pinus, sendo 23,8% menor no inchamento em espessura e 3,5% na absorção de água (LILGE; HASELEIN; SANTINI, 2021).

3.3 Biomassa florestal e cinzas

O uso de biomassa na substituição dos combustíveis tradicionais é uma boa alternativa visando a redução dos gases de efeito estufa e elevada eficiência energética. As matérias-primas mais utilizadas são os resíduos das atividades madeireiras e agrícolas, pois apresentam um alto potencial de queima (BERRA; MANGIALARDI; PAOLINI, 2015).

Barros (2021) define biomassa florestal como a matéria vegetal advinda de florestas, como madeira, galhos e folha. Esta pode estar na forma de lenha, carvão vegetal ou briquetes.

A biomassa é composta, principalmente, por celulose, hemiceluloses e lignina e pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, produtos químicos, fertilizantes e rações, por exemplo. É uma matéria-prima que apresenta vantagens sobre os demais, por ser sustentável, abundante e não competir com a cadeia alimentar de humanos (DAMASO *et al.*, 2013).

A biomassa de produtos florestais e agrícolas correspondem a cerca de 25% da matriz energética brasileira (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2022). Entretanto, com este processo há a geração de cinzas, que equivalem entre 2,7 e 3,5% do peso original da biomassa (VASSILEV *et al.*, 2010). Fava, Naik e Pierpaoli (2018) indicam que as cinzas de biomassa são compostas, principalmente, por sílica, cálcio e potássio.

Moro e Gonçalves (1995) indicam que as cinzas são resíduos industriais sólidos formados devido a combustão incompleta da biomassa florestal durante sua queima para produção de energia térmica e vapor para as indústrias de papel, celulose e siderurgia, principalmente.

A reciclagem e reutilização das cinzas estão sendo avaliadas para a atenuação do impacto no meio ambiente e diminuição de custos no transporte e aterro (RAMOS, 2018).

Este resíduo tem sido estudado, principalmente, para uso na fertilização do solo. A adição de cinzas de biomassa em uma floresta plantada de *Eucalyptus grandis*

resultou em um aumento de produtividade de 49% em relação às árvores testemunhas (MORO; GONÇALVES, 1995).

Quando aplicadas em culturas de feijão e milho, as cinzas contribuíram no aumento da produtividade de grãos e feijão e de massa seca de milho sem causar efeitos adversos ao solo (SBRUZZI, 2017).

Se faz necessário estudar outras aplicações para as cinzas, como o uso em compósitos.

3.4 Compósitos cimentícios com cinzas

A construção civil é uma área que visa o uso de materiais com alta resistência, durabilidade e custo-benefício, além de consumir uma quantidade significativa de matéria-prima. E a incorporação das cinzas em produtos cimentícios pode suprir estas necessidades, além de reduzir o impacto ambiental (MORETTO, 2020).

Borges *et al.* (2017) indicam a viabilidade do uso das cinzas na construção civil, devido a grande disponibilidade do resíduo e suas características físico-químicas que proporcionam ao material aumento da atividade pozolânica.

Segundo a NBR 12653 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2014), a pozolana constitui materiais silicosos ou silico-aluminosos que ao serem misturados com água e hidróxido de cálcio conseguem se aglomerar.

Durante esta mistura são formados produtos resistentes à hidratação do cimento, como silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado e silico-aluminato de cálcio hidratado (VIEIRA, 2005; TASHIMA, 2006).

As atividades pozolânicas englobam todas as reações que envolvem os constituintes ativos da pozolana, hidróxido de cálcio e água, relacionada a quantidade máxima da base que consegue reagir com a pozolana e a taxa de reação da mistura (MASSAZZA, 2004).

Uma alta atividade pozolânica causa uma reação mais lenta, com baixo calor de hidratação e menos problemas de fissuras, também aumenta a durabilidade e resistência do compósito e reduz a permeabilidade (CORDEIRO, 2009).

Além disso, o compósito cimentício com adição de cinzas, é uma alternativa mais sustentável, visto a aplicação de resíduos para a produção de um material com maior valor agregado e a diminuição do uso de cimento, pela substituição por cinzas, que em sua produção libera dióxido de carbono na atmosfera.

Martínez-García *et al.* (2022) complementam que esta redução do uso de cimento implica na redução do efeito estufa e também preserva as reservas de calcário, ajudando o meio ambiente e tornando a indústria da construção mais verde.

Ao estudar a adição de cinzas em diferentes granulometrias nas propriedades da argamassa, Gabrijel, Rukavina e Štirmer (2021) analisaram que as partículas com dimensões semelhantes à do cimento apresentaram maior coesividade e densidade, influenciando positivamente na resistência do material à compressão normal.

Bajto *et al.* (2021) completam que a adição de cinzas de biomassa obteve resultados satisfatórios quanto a resistência ao congelamento e degelo e a absorção de água. Em argamassas de cimento, a adição de cinzas aumentou a resistência à compressão normal e flexão do material (FOŘT *et al.*, 2020).

Ao se comparar o desempenho de cimento com cinzas de biomassa e cinzas volantes de carvão, esta primeira apresentou menor temperatura de hidratação, reduzindo a ocorrência de trincas e não alterou as propriedades mecânicas aos 28 dias até 30% de massa de cinzas em relação ao cimento (FOŘT *et al.*, 2021).

Quando avaliadas as propriedades do compósito cimento e cinzas, a adição de 15% do resíduo resultou em um aumento de 8,24% da resistência do concreto e uma leve diminuição da durabilidade do material em contato com a água (VIJAY; BABU; INDRASENA, 2021).

Hamid e Rafiq (2021) indicam que a melhor porcentagem de substituição se encontra entre 10 e 20%, onde a resistência à compressão do compósito foi de cerca de 24 MPa.

Já Bunyamin *et al.* (2021) concluíram que a melhor porcentagem foi de 5% para as cinzas provenientes de Seumantok – Indonésia, com um aumento de 10,3% em relação à substituição de 10%.

Porém, vários fatores podem influenciar no desempenho das cinzas neste material, como a procedência, a composição química, o tempo de armazenamento e a granulometria das cinzas (CAREVIĆ *et al.*, 2021).

De acordo com Sigvardsen, Geiker e Ottosen (2021), ao comparar o uso de cinzas de origens diferentes, a que possuía maior teor de alumínio apresentou resistência mecânica à compressão 13,6% maior do que a outra cinza, no teor de 20% de substituição.

Uma questão muito recorrente em relação aos compósitos cimento-madeira é a falta de compatibilidade entre os dois componentes, referente ao grau de pega do cimento, caracterizado pela diminuição das propriedades físicas.

As fibras de celulose podem interferir na hidratação dos compósitos, resultando em um atraso no tempo de pega e redução da temperatura de hidratação, devido a presença de açúcares solúveis em água que resultam em uma hidrólise alcalina da lignina e solubilização parcial das hemiceluloses (BILCATI; COSTA; PAULINO, 2022).

Este grau de compatibilidade pode ser analisado através do índice de inibição que relaciona a temperatura e o tempo de hidratação do cimento (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004).

Hansted *et al.* (2022) verificou o índice de inibição dos compósitos cimento-madeira com substituição parcial de 20% de cinzas, o índice aumentou em 27% nos compósitos com partículas de 16 *mesh* e 113% nos de 35 *mesh*. O índice de inibição, medido durante a reação de hidratação do compósito, é utilizado para determinar o retardamento da cura do mesmo.

Lima e Iwakiri (2012) verificaram que a melhor porcentagem de substituição de cimento por cinzas volante no compósito com madeira é de 5%, devido o aumento da resistência à tração e compressão em relação ao compósito sem cinzas.

Assim, o presente trabalho busca avaliar as propriedades físico-mecânicas e índice de inibição do compósito produzido com a mistura dos três materiais: cimento, madeira e cinzas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As seções a seguir apresentam as etapas de produção e os ensaios dos compósitos cimento-madeira com adição de cinzas, descrevendo as etapas de preparação da matéria-prima, confecção e ensaios dos compósitos e análise dos resultados.

4.1 Preparação da matéria-prima

O cimento utilizado para a produção dos compósitos foi o cimento Portland CP V ARI de alta resistência inicial. As cinzas de biomassa florestal oriundas da queima da madeira de eucalipto foram doadas por empresa do setor florestal da região de Sorocaba/SP, a Tabela 1 apresenta a composição química das cinzas, avaliada por Hansted (2023), com base em três amostras.

Tabela 1 – Composição química das cinzas

		Média
Componentes (%)	Nitrogênio (N)	0,27
	Pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,38
	Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,88
	Cálcio (Ca)	4,20
	Magnésio (Mg)	0,89
	Enxofre (S)	0,13
	Carbono orgânico total	1
Componentes (mg/kg)	Sódio (Na)	3669
	Cobre (Cu)	86
	Ferro (Fe)	14602
	Manganês (Mn)	1005
	Zinco (Zn)	149
pH		12

Fonte: Hansted (2023)

A madeira utilizada foi da espécie *Eucalyptus grandis*, proveniente do processamento mecânico da madeira no Laboratório de Serraria e Beneficiamento do Instituto de Ciências e Engenharia – UNESP/Itapeva.

Primeiramente, as peças de madeira foram processadas no picador de tambor e, posteriormente, no moinho tipo Wiley da marca Marconi para redução de dimensões (FIGURA 1).

Figura 1 – Processamento das partículas de madeira, sendo (A) picador de tambor e (B) moinho tipo Wiley



Fonte: Autoria própria (2023)

Na sequência, as partículas de madeira foram classificadas em um jogo de peneiras vibratórias com 3 diferentes malhas. As partículas utilizadas foram as que passaram na peneira de 9 *mesh* e ficaram retidas na peneira de 16 *mesh*. Ao fim, as partículas de madeira foram secas em estufa a temperatura de 103 ± 2 °C por um período de 24 horas, conforme Figura 2.

Figura 2 – Preparação das partículas de madeira, sendo (A) jogo de peneiras vibratórias e (B) secagem em estufa



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 Produção dos compósitos

Foram estudados 6 tratamentos diferentes, conforme Tabela 2, variando a porcentagem de substituição do cimento por cinzas. O traço representa a quantidade de cimento, cinzas, madeira e água, respectivamente. A proporção é referente à massa dos materiais.

A produção dos compósitos seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 7215 (2019). Primeiramente, o cimento, as cinzas e as partículas de madeira foram pesadas, depositadas em um recipiente e misturadas (FIGURA 3), para então ser adicionada a água. A massa foi misturada manualmente até obter consistência homogênea e, então, adicionou-se o material nos moldes.

Tabela 2 – Relação dos tratamentos produzidos

Tratamento	Traço (Cimento : Cinzas : Madeira : Água)
CP V 0%	1,00 : 0,00 : 0,20 : 0,80
CP V 5%	0,95 : 0,05 : 0,20 : 0,80
CP V 10%	0,90 : 0,10 : 0,20 : 0,80
CP V 15%	0,85 : 0,15 : 0,20 : 0,80
CP V 20%	0,80 : 0,20 : 0,20 : 0,80
CP V 25%	0,75 : 0,25 : 0,20 : 0,80

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 3 – Cimento, cinzas e madeira misturados antes da adição de água para produção do compósito



Fonte: Autoria própria (2023)

Para os ensaios mecânicos e de densidade, os corpos de prova utilizados foram moldes cilíndricos de PVC com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. Para os ensaios de inchamento em espessura e absorção de água, foram utilizados corpos de prova prismáticos com seção quadrada de 50 mm e altura de 25 mm.

Uma fina camada de desmoldante vegetal foi passada nos moldes antes da adição da mistura de cimento. Nos moldes prismáticos também foi colocada uma camada de lona plástica para evitar a aderência do compósito com o molde.

A Figura 4 apresenta os moldes utilizados, foram produzidos 6 corpos de prova prismáticos e 6 corpos de prova cilíndricos para cada tratamento.

Figura 4 – Moldes utilizados para a produção do compósito



Fonte: Autoria própria (2023)

A moldagem dos corpos de prova ocorreu imediatamente após a mistura. A colocação ocorreu em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais com 30 golpes de soquete uniformes em cada camada. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e identificados. A cura ocorreu em ambiente climatizado à 25°C até os 28 dias. A Figura 5 apresenta os corpos de prova desmoldados.

Figura 5 – Corpos de prova após o desmolde



Fonte: Autoria própria (2023)

4.3 Determinação do índice de inibição

A determinação do índice de inibição foi realizada considerando o tempo de hidratação, a temperatura de cura do cimento como também a variação máxima do tempo e da temperatura, conforme metodologia adotada por (HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984). Para a determinação do índice de inibição, foi utilizada a Equação 1.

$$II = 100 * \left[\left(\frac{t-t'}{t'} \right) * \left(\frac{T'-T}{T'} \right) * \left(\frac{S'-S}{S'} \right) \right] \begin{cases} S' = \frac{\Delta T'}{\Delta t'} \\ S = \frac{\Delta T}{\Delta t} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

II: Índice de inibição (%);

t: Tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura madeira-cimento-água seja atingida (h);

t': Tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura cimento-água seja atingida (h);

T: Temperatura máxima atingida pela mistura água-cimento-madeira (°C);

T': Temperatura máxima atingida pela mistura água-cimento (°C);

S: Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água (°C * h⁻¹);

S': Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-madeira-água (°C * h⁻¹).

A determinação foi realizada para os seis diferentes tratamentos e, também, para uma pasta de cimento e água. Para a aquisição dos tempos e temperaturas foi utilizado o sistema de aquisição de dados da *National Instruments*.

Um termopar do tipo K foi adicionado no interior do corpo de prova cilíndrico após a sua moldagem até 20 horas após sua produção. Foram determinados 10 valores a cada 3 segundos.

Os valores de temperatura utilizados foram a média destas medições no período de tempo determinado. A Figura 6 apresenta o sistema de aquisição de dados.

Figura 6 – Aquisição dos valores de temperatura e tempo dos compósitos.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.4 Determinação da densidade aparente

A determinação da densidade aparente dos compósitos ocorreu aos 28 dias após a fabricação. Primeiramente, os compósitos foram pesados em balança semi-analítica com resolução de 0,01 g e na sequência medidos com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Foram realizadas duas medidas de diâmetro e duas de altura em cada corpo de prova cilíndrico. A Figura 7 apresenta as etapas de realização do ensaio.

Figura 7 – Realização do ensaio de densidade aparente, sendo (A) pesagem em balança semianalítica e (B) medição com paquímetro digital



Fonte: Autoria própria (2023)

A densidade aparente foi determinada através da Equação 2.

$$\rho = \frac{m}{V} * 10^6 \quad (2)$$

Onde:

ρ : Densidade aparente do compósito ($\text{kg} * \text{m}^{-3}$);

m : Massa do compósito (g);

V : Volume do compósito, determinado pela Equação 3 (mm^3).

$$V = \left(\frac{\pi * d^2}{4} \right) * L \quad (3)$$

Onde:

d : Diâmetro médio do compósito (mm);

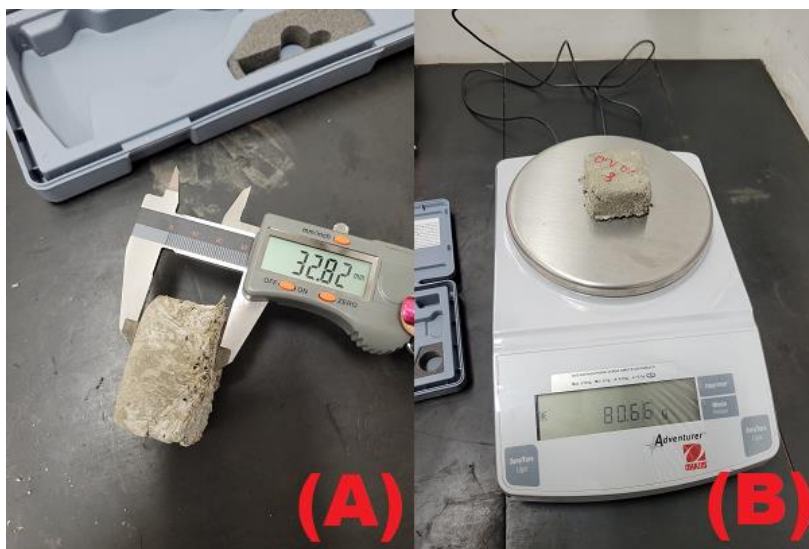
L : Altura média do compósito (mm).

4.5 Determinação do inchamento em espessura e absorção de água 24h

Para a determinação do inchamento em espessura e absorção de água 24 horas foram utilizados os corpos de prova prismáticos. Primeiramente, as amostras foram medidas em dois pontos para cada dimensão com o auxílio de um paquímetro

digital de resolução 0,01 mm e pesadas em uma balança semianalítica com resolução de 0,01 g (FIGURA 8).

Figura 8 – Realização dos ensaios de inchamento em espessura e absorção de água, sendo (A) medição da espessura e (B) pesagem do corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2023)

Na sequência, os corpos de prova foram imersos em água durante 24 horas (FIGURA 9) e depois pesados e medidos novamente.

Figura 9 – Imersão dos corpos de prova em água



Fonte: Autoria própria (2023)

O inchamento em espessura 24h foi determinado conforme a Equação 3.

$$IE = \left(\frac{e_f - e_i}{e_i} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

IE: Inchamento em espessura 24h (%);

e_i : Espessura inicial dos corpos de prova (mm);

e_f : Espessura final dos corpos de prova (mm).

A absorção de água 24h foi determinada conforme a Equação 4.

$$AA = \left(\frac{m_f - m_i}{m_i} \right) * 100 \quad (4)$$

Onde:

AA: Absorção de água 24h (%);

m_i : Massa inicial dos corpos de prova (g);

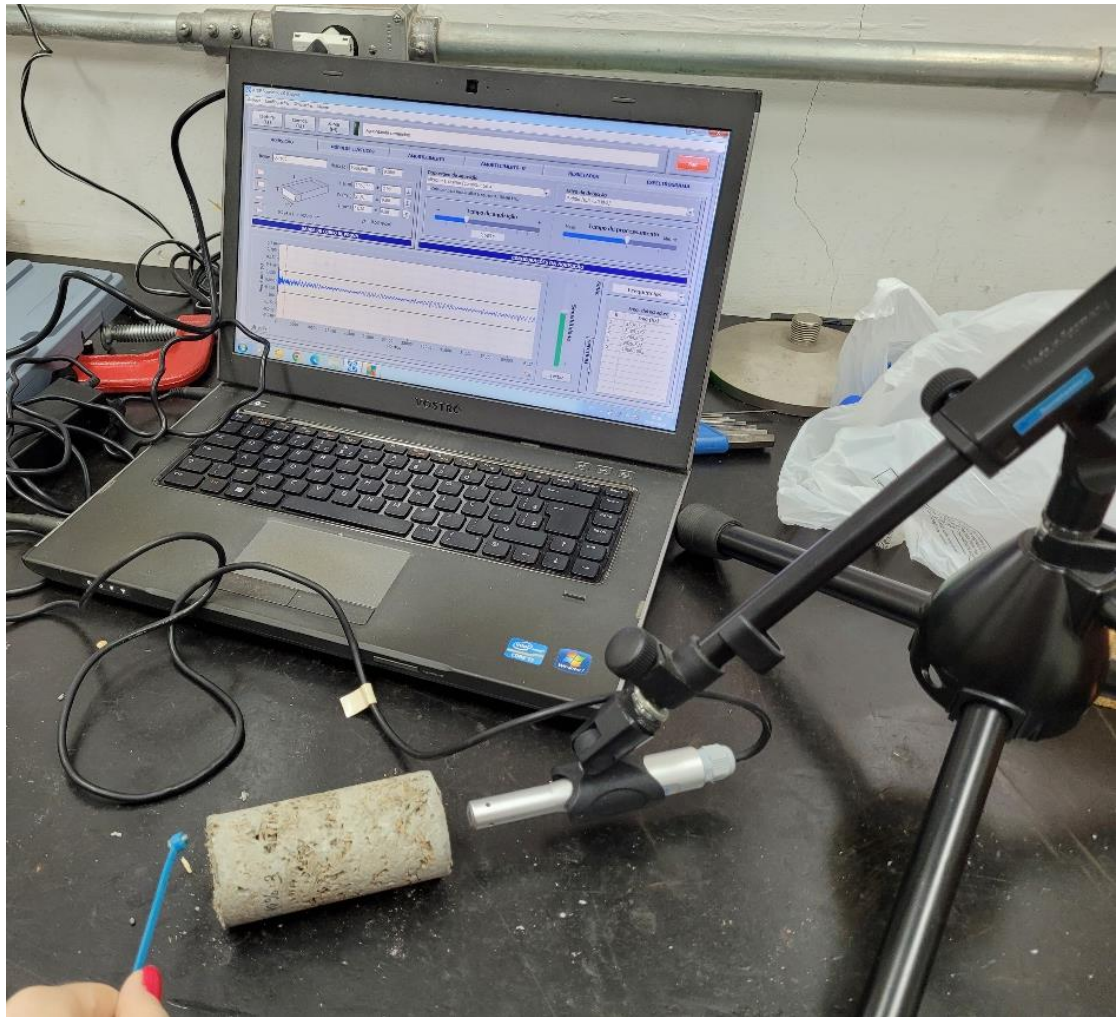
m_f : Massa final dos corpos de prova (g).

4.6 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado através do método não destrutivo pelo sistema SONELASTIC®, seguindo as recomendações da norma ASTM E1876 (2022). Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram pesados em uma balança semianalítica e medidos com o auxílio de um paquímetro digital.

Na sequência, foi realizado o ensaio não destrutivo, onde os corpos de prova foram dispostos na posição horizontal e impactados com um dispositivo, enquanto que na outra extremidade foi posicionado um microfone para captação da frequência de ressonância longitudinal. O ensaio foi realizado conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Realização do ensaio não destrutivo pelo sistema SONELASTIC®



Fonte: Autoria própria (2023)

O valor do módulo de elasticidade dinâmico foi determinado conforme Equação 5.

$$Ec_d = 16 * m * fl^2 * \left(\frac{L}{\pi * d^2 * K} \right) * 10^{-6} \quad (5)$$

Onde:

Ec_d : Módulo de elasticidade à compressão dinâmico (MPa);

fl : Média de três medidas consecutivas da frequência de ressonância longitudinal (Hz);

d : Diâmetro médio do corpo de prova (mm);

L : Altura média do corpo de prova (mm);

K : Fator de correção calculado através da Equação 6.

$$K = 1 - \left(\frac{\pi^2 * \mu^2 * d^2}{8 * L^2} \right) \quad (6)$$

Onde:

μ : Coeficiente de Poisson, foi utilizado o valor de 0,15, referente ao concreto (ALMEIDA, 2002).

4.7 Determinação do módulo de elasticidade estático e resistência à compressão aos 28 dias

O ensaio de compressão foi realizado aos 28 dias para a determinação do módulo de elasticidade estático e da resistência, com base na norma ABNT NBR 7215 (2019).

Para a realização do ensaio foi utilizada a máquina universal de testes EMIC com capacidade de 300 kN, a velocidade de carregamento da máquina foi de $0,25 \pm 0,05 \text{ MPa} * \text{s}^{-1}$. Os corpos de prova foram comprimidos até a ruptura. A Figura 11 apresenta a realização do ensaio.

Figura 11 – Realização do ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autoria própria (2023)

4.8 Análise estatística

Após a realização dos ensaios, foi realizada a análise estatística. Primeiramente, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados e o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade das variâncias.

Na sequência foi realizada a análise de variância (ANOVA) para verificar se existia diferença estatística entre as médias ao nível de 5% de significância e, nos casos necessários, o teste de Tukey para verificar quais médias variaram.

Também foi realizada a análise de regressão para verificar a correlação entre as propriedades e a variação do teor de substituição do cimento por cinzas. Todos testes estatísticos foram realizados com o auxílio do *software* R versão 4.2.2.

5 RESULTADOS

A seção a seguir apresenta os resultados obtidos no presente trabalho para os ensaios de índice de inibição, densidade aparente, inchamento em espessura 24 horas, absorção de água 24 horas, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de elasticidade estático e resistência à compressão aos 28 dias.

5.1 Índice de inibição

A Tabela 3 apresenta os valores de índice de inibição encontrado para cada tratamento produzido.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de índice de inibição

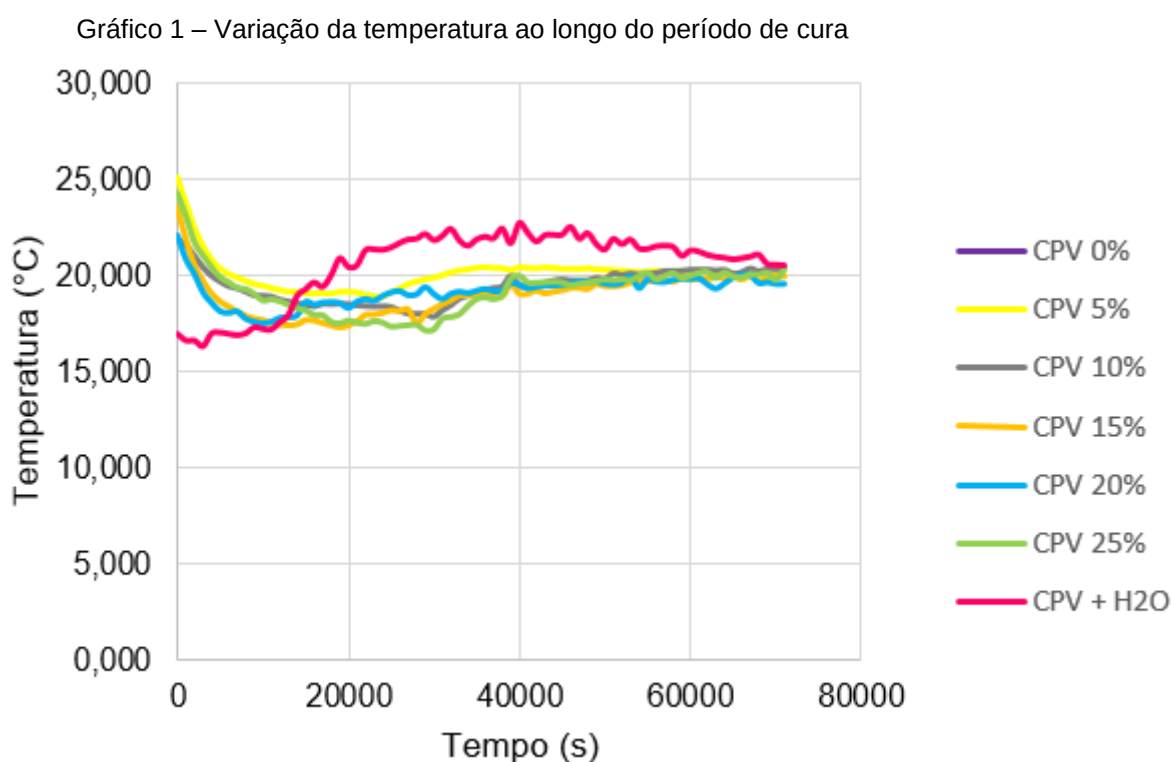
Tratamento	Índice de Inibição
CP V 0%	-2,25
CP V 5%	1,19
CP V 10%	-8,82
CP V 15%	-1,32
CP V 20%	2,09
CP V 25%	3,39

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com Okino *et al.* (2003), o índice de inibição é utilizado para se classificar a compatibilidade entre o cimento e a madeira. Um índice inferior a 10 é classificado como baixa inibição, de 10 a 50 moderada, de 50 a 100 alta e superior a 100 extrema. Valores de índice de inibição negativos indicam erros de leitura durante o período avaliado. Tais erros podem ser justificados por falha do equipamento de leitura das temperaturas, oscilação de energia no laboratório, mal contato entre o terminal do termopar e o compósito.

Desta forma, todos os compósitos produzidos apresentaram baixa inibição ou inibição negativa, e não existe uma tendência de aumento ou diminuição da compatibilidade, a partir do aumento do teor de cinzas adicionado. Estudo encontrado na literatura indica que a adição de madeira e cinza apresentou resultados inconclusivos sobre a compatibilidade cimento, madeira e cinzas de biomassa, porém os autores observaram que a maior incompatibilidade pode ser atribuída a cinza (HANSTED *et al.*, 2022). Resultados não conclusivos podem ser justificados pelo sistema adotado. Sugere-se que um sistema mais isolado, sem interferência de variáveis externas como ventilação e mudanças climáticas sejam adotadas para que os resultados possam ser mais precisos.

O Gráfico 1 apresenta a variação de temperatura dos compósitos e da pasta cimentícia ao longo de 20 horas. Devido ao grande volume de dados, foram plotados no gráfico as médias das temperaturas a cada 1000 segundos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A curva de variação da temperatura durante o período de cura apresentou comportamento semelhante para todos os tratamentos do compósito, entretanto diferente da curva de hidratação da pasta cimentícia. Weber *et al.* (2017) explicam

que os extrativos presentes na madeira influenciam na curva, afetando a temperatura máxima e aumento do tempo de obtenção da temperatura máxima de hidratação.

5.2 Densidade aparente

A Tabela 4 apresenta os valores determinados no ensaio de densidade aparente, contendo a média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística, onde letras iguais na vertical não apresentam diferença estatística ao nível de 5% de significância.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de densidade aparente

Tratamento	Média (kg * m⁻³)	Desvio padrão (kg * m⁻³)	Coeficiente de variação (%)
CP V 0%	1104 A	18	1,65
CP V 5%	1092 AB	27	2,50
CP V 10%	1059 AB	63	5,94
CP V 15%	1091 AB	26	2,35
CP V 20%	1080 AB	89	8,25
CP V 25%	1014 B	39	3,90

Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 2 apresenta os valores de densidade para cada tratamento e a curva de regressão linear correlacionando o aumento do teor de cinzas adicionadas com a variação da propriedade.

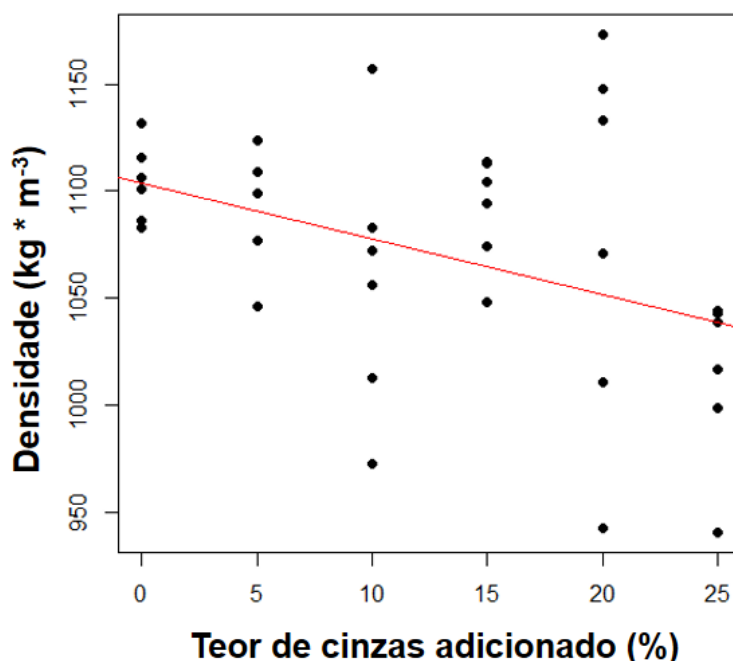
A Equação 7 apresenta a função de regressão linear para o ensaio de densidade aparente. O valor de correlação é de 40,50%.

$$\rho = 1104 - 2,607 * T.C. \quad (7)$$

Onde:

T.C.: Teor de cinzas adicionado (%).

Gráfico 2 – Densidade em função do teor de cinzas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Conforme o aumento da substituição do cimento Portland CPV-ARI pelas cinzas de madeira, houve a redução da densidade, isto se deve ao fato da densidade das cinzas serem ligeiramente inferiores a pasta cimentícia.

O mesmo ocorreu na pesquisa de Gabrijel, Rukavina e Štirmer (2021), onde ocorreu a redução da densidade do concreto com a substituição do cimento por cinzas de madeira.

E, também, em argamassas de cimento com adição de cinzas, com redução da densidade de 3, 5, e 7%, em relação ao controle, para as substituições de 10, 20 e 30% respectivamente (FORȚ *et al.*, 2020).

5.3 Inchamento em espessura e absorção de água 24 horas

A Tabela 5 apresenta os valores determinados no ensaio de inchamento em espessura 24 horas, contendo a média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística, onde letras iguais na vertical não apresentam diferença estatística ao nível de 5% de significância.

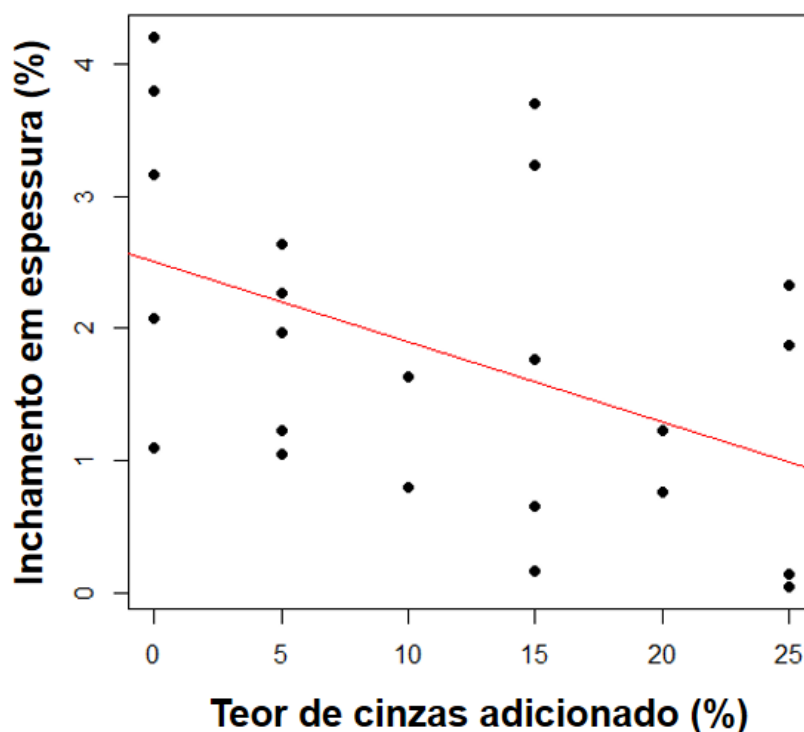
Tabela 5 – Resultados do ensaio de inchamento em espessura 24 horas

Tratamento	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
CP V 0%	2,87 A	1,27	44,31
CP V 5%	1,83 A	1,23	66,87
CP V 10%	1,22 A	0,59	48,10
CP V 15%	1,90 A	1,55	81,64
CP V 20%	1,00 A	0,33	32,90
CP V 25%	1,10 A	1,17	106,80

Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 3 apresenta os valores de inchamento em espessura para cada tratamento e a curva de regressão linear correlacionando o aumento do teor de cinzas adicionadas com a variação da propriedade.

Gráfico 3 – Inchamento em espessura em função do teor de cinzas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A Equação 8 apresenta a função de regressão linear para o ensaio de inchamento em espessura. O valor de correlação é de 45,74%.

$$IE = 2,51 - 2,061 * T.C. \quad (8)$$

No ensaio de inchamento em espessura, não houve variação estatística entre os tratamentos, porém apresentou uma tendência de redução com o aumento da quantidade de cinzas. O mesmo ocorreu no estudo de Chen *et al.* (2020) com adição de cinzas volantes em placas cimentícias. Entretanto, o valor do coeficiente de variação foi elevado. Recomenda-se a adaptação deste método de ensaio para esse tipo de material.

Esse é um fator favorável e justificado pela menor granulometria das cinzas que reduzem os vazios presentes no compósito, devido ao aumento da área superficial das partículas, proporcionando melhor interação entre os materiais (HANSTED *et al.*, 2022).

A tendência de redução do inchamento em espessura indica que o gel C-S-H formado na reação das cinzas com o hidróxido de cálcio contribui para a durabilidade dos compósitos, mesmo com a redução da quantidade de cimento inserida (YEL; URUN, 2022).

A Tabela 6 apresenta os valores determinados no ensaio de absorção de água 24 horas, contendo a média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística, onde letras iguais na vertical não apresentam diferença estatística ao nível de 5% de significância.

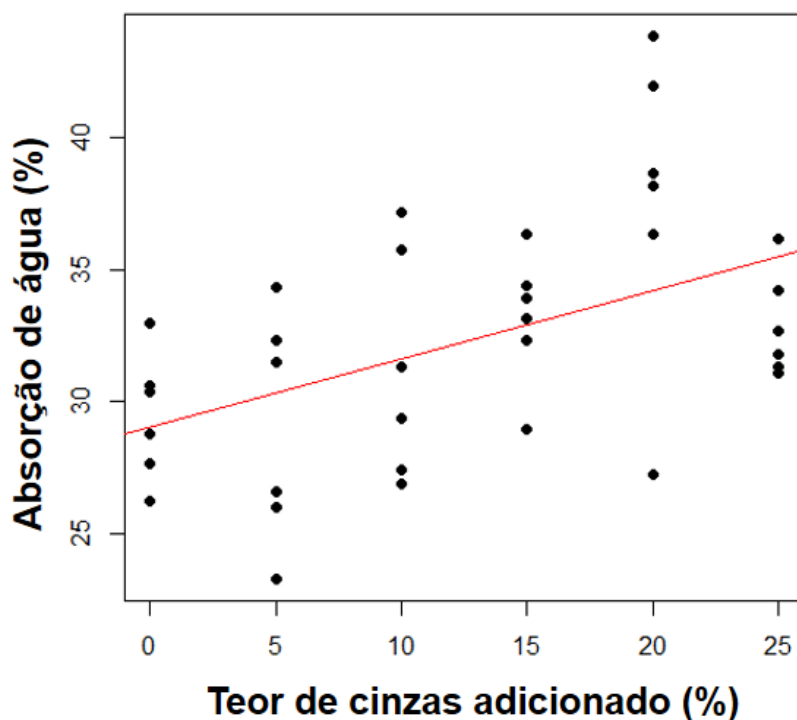
Tabela 6 – Resultados do ensaio de absorção de água 24 horas

Tratamento	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
CP V 0%	29,44 B	2,40	8,15
CP V 5%	29,01 B	4,32	14,88
CP V 10%	31,31 AB	4,30	13,73
CP V 15%	33,19 AB	2,49	7,49
CP V 20%	37,69 A	5,79	15,37
CP V 25%	32,88 AB	1,99	6,05

Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 4 apresenta os valores de absorção de água para cada tratamento e a curva de regressão linear correlacionando o aumento do teor de cinzas adicionadas com a variação da propriedade.

Gráfico 4 – Absorção de água em função do teor de cinzas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A Equação 9 apresenta a função de regressão linear para o ensaio de absorção de água. O valor de correlação é de 48,74%.

$$AA = 29,0 + 0,258 * T.C. \quad (9)$$

No ensaio de absorção de água, ocorreu o aumento da absorção conforme a diminuição da quantidade de cimento. Ghewa *et al.* (2020) explica que isto ocorre, pois a cinzas apresenta quantidade significativa de cálcio, que é hidrofílico, e inferior de sílica, um elemento hidrofóbico.

Vu *et al.* (2019) também encontraram o aumento da absorção de água em painéis cimento-madeira conforme o aumento da quantidade de cinzas adicionada, que variou de 38,8% para painéis sem cinzas até 76,1% para painéis com substituição de 50% de cimento por cinzas.

Complementa-se que isto também ocorre, devido a diminuição da quantidade de cimento e, conseqüentemente, a redução da reação de hidratação. Desta forma, a água evapora mais rapidamente, gerando mais poros no compósito, facilitando a entrada da água (VU *et al.*, 2019).

5.4 Módulo de elasticidade dinâmico

A Tabela 7 apresenta os valores determinados pelo ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, contendo a média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística, onde letras iguais na vertical não apresentam diferença estatística ao nível de 5% de significância.

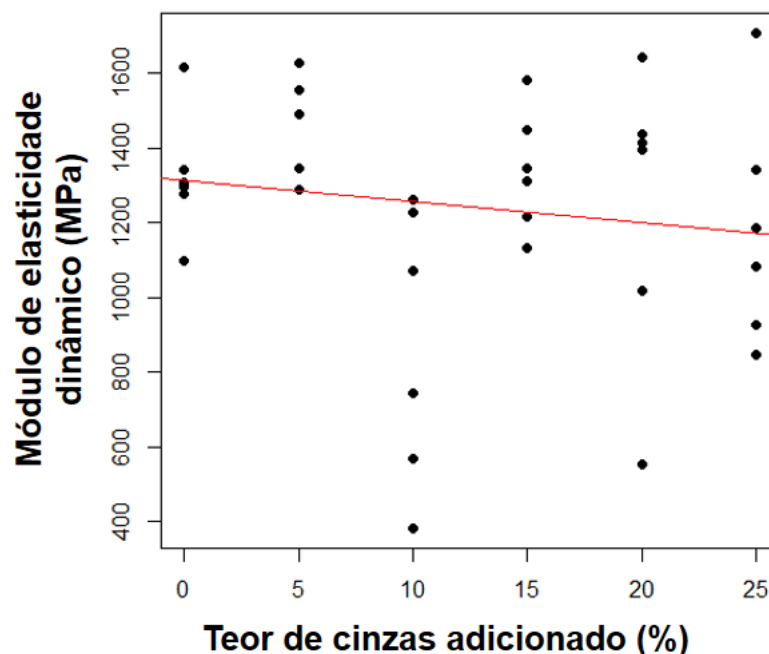
Tabela 7 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

Tratamento	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
CP V 0%	1324 AB	168	12,66
CP V 5%	1489 A	144	9,66
CP V 10%	877 B	364	41,51
CP V 15%	1340 AB	161	12,00
CP V 20%	1243 AB	393	31,63
CP V 25%	1182 AB	312	26,42

Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 5 apresenta os valores de módulo de elasticidade dinâmico para cada tratamento e a curva de regressão linear correlacionando o aumento do teor de cinzas adicionadas com a variação da propriedade.

Gráfico 5 – Módulo de elasticidade dinâmico em função do teor de cinzas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A Equação 10 apresenta a função de regressão linear para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico. O valor de correlação é de 15,23%.

$$Ec_d = 1313 - 5,629 * T.C. \quad (10)$$

O valor do módulo de elasticidade dinâmico é superior ao estático, pois o carregamento é aplicado instantaneamente e quanto mais rápido se aplica o carregamento maior é o valor encontrado de rigidez. Porém, a correlação entre o aumento da quantidade de cinzas adicionada e o valor do módulo de elasticidade dinâmico determinado pelo ensaio não destrutivo é considerada baixa, desta forma não é possível prever a rigidez do compósito através deste método.

5.5 Módulo de elasticidade estático e resistência a compressão aos 28 dias

A Tabela 8 apresenta os valores determinados no ensaio de módulo de elasticidade estático, contendo a média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística, onde letras iguais na vertical não apresentam diferença estatística ao nível de 5% de significância.

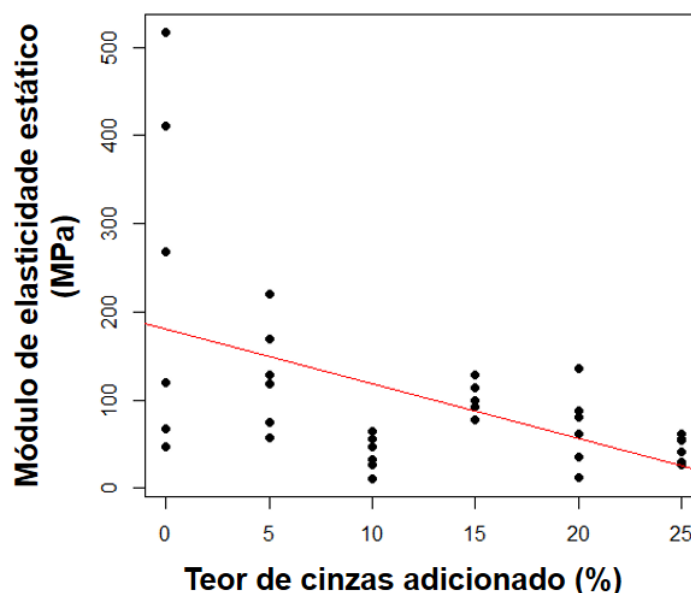
Tabela 8 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático

Tratamento	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
CP V 0%	239 A	194	81,31
CP V 5%	128 AB	60	47,08
CP V 10%	40 B	20	50,60
CP V 15%	98 AB	21	20,88
CP V 20%	69 B	43	63,33
CP V 25%	45 B	15	34,00

Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 6 apresenta os valores de módulo de elasticidade estático para cada tratamento e a curva de regressão linear correlacionando o aumento do teor de cinzas adicionadas com a variação da propriedade.

Gráfico 6 – Módulo de elasticidade estático em função do teor de cinzas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A Equação 11 apresenta a função de regressão linear para o ensaio de módulo de elasticidade estático. O valor de correlação é de 51,29%.

$$Ec_e = 181 - 6,223 * T.C. \quad (11)$$

Onde:

E_{ce} : Módulo de elasticidade à compressão (MPa).

O módulo de elasticidade estático apresentou uma redução com o aumento da quantidade de cinzas adicionada, devido a redução da densidade do compósito cimento-madeira.

A Tabela 9 apresenta os valores determinados no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, contendo a média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística, onde letras iguais na vertical não apresentam diferença estatística ao nível de 5% de significância.

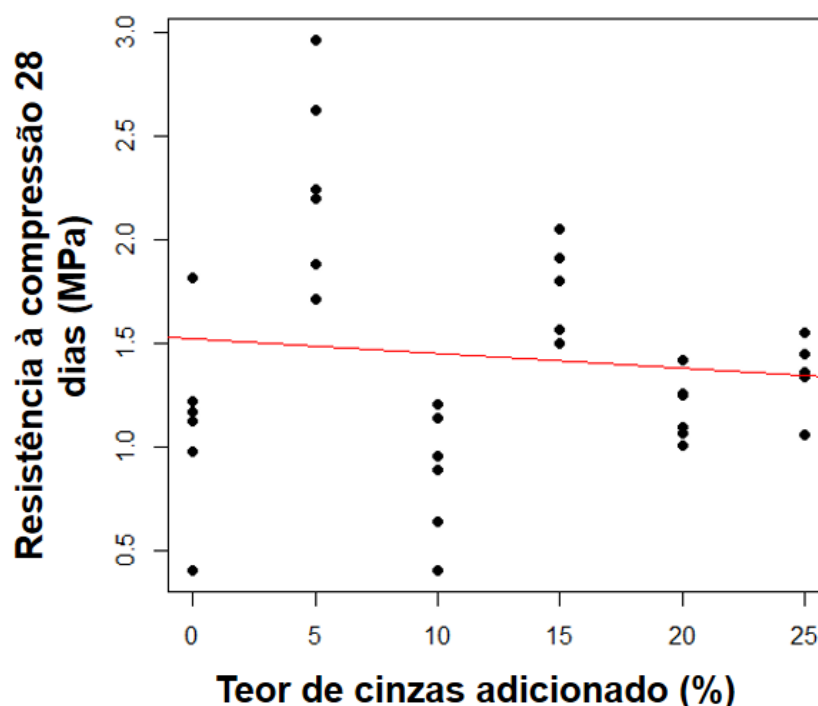
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Tratamento	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
CP V 0%	1,12 C	0,45	40,39
CP V 5%	2,27 A	0,46	20,39
CP V 10%	0,88 C	0,30	34,72
CP V 15%	1,79 AB	0,21	11,96
CP V 20%	1,19 C	0,15	12,86
CP V 25%	1,35 BC	0,16	12,11

Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 7 apresenta os valores de resistência à compressão aos 28 dias para cada tratamento e a curva de regressão linear correlacionando o aumento do teor de cinzas adicionadas com a variação da propriedade.

Gráfico 7 – Resistência à compressão em função do teor de cinzas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A Equação 12 apresenta a função de regressão linear para o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. O valor de correlação é de 10,46%.

$$fck = 1,52 - 0,007 * T.C. \quad (11)$$

Onde:

fck : Resistência à compressão aos 28 dias (MPa).

A resistência à compressão aos 28 dias apresentou tendência de redução com o aumento da substituição do cimento pelas cinzas de madeira. O mesmo ocorreu no trabalho de Iwakiri e Lima (2012), em compósitos cimento-madeira com adição de cinzas volantes, onde o tratamento com substituição de 5% apresentou o melhor resultado.

A resistência à compressão de concreto com adição de 15% de cinzas foi 6% inferior em relação ao concreto sem cinzas e o concreto com 30% de substituição de cinzas apresentou resistência 30% inferior (GABRIJEL; RUKAVINA; ŠTIRMER, 2021).

Tkaczewska e Małolepszy (2009) explicam que a redução da resistência à compressão dos compósitos com a adição das cinzas ocorre devido o aumento do número de poros e a formação de uma microestrutura com maior permeabilidade.

A Tabela 10 apresenta os valores de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) realizado pelo método não destrutivo e os ensaios de módulo de elasticidade estático (E_{ce}) e resistência à compressão (f_{ck}) realizados pelo método destrutivo.

Tabela 10 – Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e as demais propriedades mecânicas

Tratamento	Correlação (%)	
	E_{cd} e E_{ce}	E_{cd} e f_{ck}
CP V 0%	44,63	3,04
CP V 5%	30,93	61,35
CP V 10%	20,15	86,11
CP V 15%	86,12	92,78
CP V 20%	54,55	51,40
CP V 25%	76,54	26,44
Correlação geral	36,70	58,07

Fonte: Autoria própria (2023)

O módulo de elasticidade dinâmico e estático apresentaram fraca correlação entre si no geral, com destaque para os tratamentos CP V 15% e CP V 25% que apresentaram alta correlação.

Enquanto o módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão apresentaram correlação moderada no geral, com destaque aos tratamentos CP V 5%, CP V 10% e CP V 15% que apresentaram alta correlação.

Uma alta correlação entre os ensaios representa a possibilidade de prever as propriedades mecânicas do compósito sem a necessidade da sua ruptura.

6 CONCLUSÕES

A adição de cinzas de biomassa em compósitos cimento-madeira apresenta potencial de uso, por apresentar propriedades semelhantes ou superiores dos compósitos sem cinzas, sendo assim uma boa forma de reutilização do resíduo.

Através do índice de inibição encontrado pode-se classificar todos os tratamentos, com e sem cinzas, como baixa inibição. Porém, não houve tendência de aumento ou diminuição da compatibilidade, conforme o teor de cinzas adicionado. Se torna interessante a realização de ajustes no método de leitura das temperaturas para confirmação dos valores obtidos.

A densidade dos compósitos reduziu à medida que a quantidade de cinzas aumentou e, conseqüentemente, de cimento diminuiu. Isso se deve à densidade das cinzas serem ligeiramente inferiores à densidade do cimento.

Os tratamentos estudados não diferiram entre si no ensaio de inchamento em espessura, ao nível de 5% de significância, porém apresentaram uma tendência de redução. Entretanto, no ensaio de absorção de água, houve o aumento do valor conforme o aumento da quantidade de cinzas adicionadas, isto se deve a menor quantidade de cimento presente na mistura.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico encontrados através do ensaio não destrutivo não apresentaram uma tendência de acordo com a variação de substituição de cinzas, fenômeno confirmado pela baixa correlação. Assim, não se é possível prever as propriedades mecânicas sem a ruptura do compósito.

Nos ensaios de módulo de elasticidade estático e resistência à compressão aos 28 dias, as propriedades reduziram com o aumento da substituição de cimento por cinzas de biomassa.

Destaca-se o tratamento CP V 5%, por apresentar melhores propriedades físico-mecânicas no geral, sendo passível seu uso sem queda de desempenho e de forma mais sustentável.

Para trabalhos futuros, sugere-se a produção dos compósitos de forma mecanizada, com o auxílio de argamasseiras e mesa vibratória.

Recomenda-se a medição da temperatura interna dos compósitos por um tempo superior há 20 horas, pois este tempo pode não ter sido suficiente para a cura do cimento, e a adição de um aditivo acelerador de cura.

Indica-se também a realização de ensaios para a determinação das propriedades termo-acústicas dos compósitos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. C. de. **Concreto**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002. 24 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3878**: Standard Terminology for Composite Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken: ASTM, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BAJTO, J. Š. *et al.* Pilot Scale Production of Precast Concrete Elements with Wood Biomass Ash. **Materials**, [s.l.], v. 14, n. 21, p. 1-23, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216578>.

BARROS, T. D. **Agroenergia - Florestal**. 2021. EMBRAPA. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/florestal>. Acesso em: 03 dez. 2022.

BERRA, M.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A. E. Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 76, n. 1, p. 286-296, fev. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.052>.

BILCATI, G. K.; COSTA, M. do R. de M. M. da; PAULINO, R. S. Efeito do reforço multi-escala fibra de celulose-microcelulose cristalina na fase de hidratação de pastas de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 4, p. 1-17, maio 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0220>.

BORGES, D. *et al.* Uso de cinza de madeira de eucalipto em compostos cimentícios, uma alternativa sustentável. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, [s.l.], v. 5, n. 11, p. 89-103, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.17271/2317860451120171678>.

BUNYAMIN, B. *et al.* Utilization of wood processing dust as a substitute for a part of cement in concrete. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 1087, n. 1, p. 1-7, fev. 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1087/1/012004.

CAREVIĆ, I. *et al.* Effect of Wood Biomass Ash Storage on the Properties of Cement Composites. **Materials**, [s.l.], v. 1632, n. 14, p. 1-17, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14071632>.

CASTRO, V. G. de; PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S. Produção de compósitos madeira-cimento de baixa densidade pelo método vibro-dinâmico de compactação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 1-11, mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0666>.

CHEN, L. *et al.* Efficacy of green alternatives and carbon dioxide curing in reactive magnesia cement-bonded particleboards. **Journal Of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 258, p. 1-8, jun. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120997>.

CORDEIRO, L. de N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DAMASO, M. C. T. *et al.* Pesquisa para turbinar biomassa florestal. **Revista Ambiente Energia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 19-22, dez. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 25 out. 2022.

FAVA, G.; NAIK, T.; PIERPAOLI, M. Compressive Strength and Leaching Behavior of Mortars with Biomass Ash. **Recycling**, [s.l.], v. 3, n. 3, p. 46, set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling3030046>.

FOŘT, J. *et al.* Assessment of Wood-Based Fly Ash as Alternative Cement Replacement. **Sustainability**, [s.l.], v. 12, n. 22, p. 1-16, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12229580>.

FOŘT, J. *et al.* Biomass fly ash as an alternative to coal fly ash in blended cements: functional aspects. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 271, n. 1, p. 1-11, fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121544>.

GABRIJEL, I.; RUKAVINA, M. J.; ITIRMER, N. Influence of Wood Fly Ash on Concrete Properties through Filling Effect Mechanism. **Materials**, [s.l.], v. 14, n. 23, p. 1-22, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14237164>.

GERMANO, B. de P. **Uso de resíduos de fibra de vidro da indústria eólica na produção de compósitos matriz poliéster**. 2022. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GHEWA, G. J. P. *et al.* Investigation of Water Absorption for Concrete Using Supplementary Materials. **Iptek The Journal Of Technology And Science**, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 309-317, 2020.

HAMID, Z.; RAFIQ, S. An experimental study on behavior of wood ash in concrete as partial replacement of cement. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 46, n. 9, p. 3426-3429, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.776>.

HASHIN, Z. Analysis of Composite Materials—A Survey. **Journal Of Applied Mechanics**, New York, v. 50, n. 3, p. 481-505, set. 1983. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3167081>.

HANSTED, F. A. S. *et al.* Potencial de reciclagem de resíduos de madeira e cinza de caldeira de biomassa em um material compósito cimentício. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, E.V., p. 1-10, jul. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6646>.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing Characteristics of Wood Particles From Nine Northern Rocky Mountain Species Mixed With Portland Cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57–61, 1984. Disponível em: <http://europepmc.org/abstract/AGR/GUA84036583>.

HSISSOU, R. *et al.* Polymer composite materials: a comprehensive review. **Composite Structures**, Oxford, v. 262, p. 1-15, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>.

IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. **Blackwell Scientific Publications**, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68-74, mar. 2008.

IWAKIRI, S. *et al.* Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303-308, jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000200015>.

IWAKIRI, S. *et al.* Propriedades tecnológicas de painéis cimento-madeira produzidos com partículas de eucalipto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 14, n. 3, p. 217-223, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711432015217>.

JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, Berlim, v. 62, n. 5, p. 370-377, jul. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>.

KERNI, L. *et al.* A review on natural fiber reinforced composites. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 28, n. 1, p. 1616-1621, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.851>.

KESIKIDOU, F.; STEFANIDOU, M. Natural fiber-reinforced mortars. **Journal Of Building Engineering**, [s.l.], v. 25, n. 1, p. 1-6, set. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100786>.

LILGE, D. S.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Avaliação do desempenho de painéis cimento-madeira fabricados com duas espécies florestais em combinação com casca de arroz. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 20-42, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509810859>.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de madeira de pinus spp, cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 639-650, out. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v42i3.17310>.

MACÊDO, A. N.; SOUZA, A. A. C.; POMPEU NETO, B. B. Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 131-150, jun. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212012000200009>.

MARCHESAN, R. *et al.* Painel cimento-madeira produzido por compactação vibro dinâmica no sul do Tocantins. **Engenharia Florestal: contribuições, análises e práticas em pesquisa**, [s.l.], p. 185-202, 2022. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/220207709>.

MARTÍNEZ-GARCÍA, R. *et al.* The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: a review. **Materials**, [s.l.], v. 15, n. 15, p. 1-20, ago. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15155349>.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: Hewlett, P.C. (4) **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. Londres: Elsevier Science & Technology Books, 2004. p. 471-631.

MONALDO, E.; NERILLI, F.; VAIRO, G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. **Composite Structures**, Oxford, v. 214, n. 1, p. 246-263, abr. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.002>.

MORETTO, R. P. **Comportamento mecânico do concreto compactado com rolo com adição da cinza de madeira**. 2020. 62 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

MORO, L.; GONÇALVES, J. L. de M. Efeitos da "cinza" de biomassa florestal sobre a produtividade de povoamentos puros de *Eucalyptus grandis* e avaliação financeira. **IPEF**, [s.l.], v. 1, n. 49, p. 18-27, dez. 1995.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Sistema de aquisição de dados**. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/support/documentation/supplemental/10/data-acquisition-reference-design-for-labview.html>. Acesso em: 21 fev. 2023.

OKINO, E. Y. A. *et al.* Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement And Concrete Composites**, Barking, v. 26, n. 6, p. 729-734, ago. 2004. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(03\)00061-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(03)00061-1).

R- Core Team (2023). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAMOS, G. M. **Análise das propriedades do concreto permeável com adição de agregado miúdo e resíduo (cinza de madeira)**. 2018. 90 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

ROCHA, D. L. *et al.* A Review of the Use of Natural Fibers in Cement Composites: concepts, applications and brazilian history. **Polymers**, [s.l.], v. 14, n. 10, p. 1-22, maio 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/polym14102043>.

SBRUZZI, E. K. **Cinza de biomassa florestal para aplicação nas culturas do feijão e do milho**. 2017. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade do Estado de Santa Catarina, Lajes, 2017.

SIGVARDSEN, N. M.; GEIKER, M. R.; OTTOSEN, L. M. Reaction mechanisms of wood ash for use as a partial cement replacement. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 286, n. 1, p. 1-11, jun. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122889>.

STOKKE, D. D.; WU, Q.; HAN, G. **Introduction to Wood and Natural Fiber Composites**. 1. ed. Hoboken: Sustainable Chemistry & Green Chemistry, 2013.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. Dissertação (Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, 2006.

TKACZEWSKA, E.; MAŁOLEPSZY, J. Hydration of coal–biomass fly ash cement. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 23, n. 7, p. 2694-2700, jul. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.018>.

VASSILEV, S. V. *et al.* An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, Guildford, v. 89, n. 5, p. 913-933, maio 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.

VIEIRA, A. A. P., **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.

VIJAY, K.; BABU, K. H.; INDRASENA, Y. V. Effect of Wood-Ash as Partial Replacement to Cement on Performance of Concrete. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 796, n. 1, p. 1-6, jun. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012020>.

VILLAS-BÔAS, B. T. *et al.* Avaliação dos efeitos de diferentes dosagens de água/cal na resistência à compressão axial de compósitos de madeira-cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 1-10, mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0109>.

VU, V. *et al.* The Effect of Wood Ash as a Partial Cement Replacement Material for Making Wood-Cement Panels. **Materials**, [s.l.], v. 12, n. 17, p. 1-11, ago. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma12172766>.

WEBER, A. M. *et al.* Análise da influência do traço nas propriedades do compósito cimento-madeira. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, v. 1, n. 36, p. 50-59, ago. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n36p50-59>.

YEL, H.; URUN, E. Performance of cement-bonded wood particleboards produced using fly ash and spruce planer shavings. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, Concepcion, v. 24, p. 1-10, ago. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100444>.