



GUSTAVO BARBOSA RIBEIRO

**REAPROVEITAMENTO DE EMBALAGENS DE CIMENTO
PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO: MADEIRA**

**LAVRAS - MG
2023**

GUSTAVO BARBOSA RIBEIRO

**REAPROVEITAMENTO DE EMBALAGENS DE CIMENTO PARA A PRODUÇÃO
DE PAINÉIS CIMENTO: MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Materiais e Meio Ambiente, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Camila Soares Fonseca
Orientadora

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).

Ribeiro, Gustavo Barbosa.

Reaproveitamento de embalagens de cimento para a produção de painéis cimento: madeira/ Gustavo Barbosa Ribeiro. – 2022.
55 p. : il.

Orientadora: Camila Soares Fonseca.

Coorientador: José Benedito Guimarães Junior.

Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2022

Bibliografia.

1. Compósitos cimentícios. 2. Resíduos da construção civil. 3. Papel Kraft. I. Fonseca, Camila Soares. II. Guimarães Junior, José Benedito. III. Título.

GUSTAVO BARBOSA RIBEIRO

**REAPROVEITAMENTO DE EMBALAGENS DE CIMENTO PARA A PRODUÇÃO
DE PAINÉIS CIMENTO: MADEIRA**

**REUSE OF CEMENT PACKAGING 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 Ambiental, área de concentração em Materiais e Meio Ambiente, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 03 de novembro de 2022.

Profa. Dra. Daniela Rodrigues Borba Valadão UFLA

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva CEFET-MG



P/ Profa. Dra. Camila Soares Fonseca
Orientadora

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, por toda a paciência e dedicação, ao longo de todo o período de construção do trabalho, pelo aprendizado e oportunidade de desenvolver essa linha de pesquisa.

Ao professor, Dr. José Benedito Guimarães Junior, pela orientação e paciência em compartilhar seu conhecimento na área.

Ao Dr. Lorrán de Sousa Arantes, pelo suporte técnico e paciência ao me ajudar a produzir, com qualidade, os painéis desenvolvidos na pesquisa.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

As embalagens de cimento se destacam pelo volume gerado no setor da construção civil e pela dificuldade de reutilização ou reciclagem. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da substituição de diferentes quantidades de resíduos de embalagens de cimento nas propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento: madeira. O plano experimental envolveu cinco tratamentos (T1:T5), nessa sequência, para compor os painéis com 0, 25, 50 e 75 e 100% de embalagens de cimento em substituição à madeira de eucalipto. Os painéis foram produzidos com densidade aparente nominal de 1,25 g/cm³, prensados com 4,0 MPa, durante um período de 10 min. Posteriormente os painéis foram acondicionados a uma temperatura de 20 ± 2°C durante 28 dias. A gradual substituição de madeira por embalagem de cimento aumentou a porcentagem de absorção de água e inchamento em espessura. As propriedades mecânicas módulo de elasticidade, compressão paralela à superfície e tração perpendicular foram reduzidas com a gradual substituição de embalagem de cimento. No entanto o módulo de ruptura (MOR) apresentou melhores resultados com uma taxa limite aceitável de até 23,17%. Recomenda-se uma máxima substituição da embalagem de cimento em 30,25% pelo ensaio de tração perpendicular (TP), conforme os critérios do processo Bison (1978). Deve-se avaliar a interferência, em relação às outras propriedades físicas e mecânicas, para efeito de ajuste da substituição de embalagem de cimento, conforme uso e ambiente do painel cimento: madeira.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios. Resíduos da construção civil. Papel Kraft.

ABSTRACT

Cement packaging stands out for the volume generated in the construction sector and the difficulty of reuse or recycling. In this context, this study aimed to evaluate the effect of substituting different amounts of cement packaging waste on the physical-mechanical properties of cement: wood panels. The experimental plan involved five treatments (T1:T5) in composing the panels with 0, 25, 50, 75, and 100% cement packaging to replace eucalyptus wood. The panels were produced with a nominal bulk density of 1.25 g/cm³ and pressed with 4.0 MPa for 10 min. Subsequently, the panels were conditioned at a temperature of 20 ± 2°C for 28 days. The gradual replacement of wood with cement packing increased the percentage of water absorption and swelling in thickness. The elasticity, compression parallel to the surface, and perpendicular traction mechanical properties modulus were reduced with the gradual replacement of cement packing. However, the rupture modulus (MOR) showed better results with an acceptable limit rate of up to 23.17%. A maximum of 30.25% replacement of the cement package is recommended according to the perpendicular tensile test (PT), by the Bison process criteria (1978). The interference should be evaluated for the purpose of adjusting the replacement of cement packaging according to the use and environment of the cement: wood panel.

Keywords: Cementitious composites. Construction waste. Kraft Paper.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Esquema de classificação com vários tipos de compósitos	14
Figura 2 - Micrografias SEM após 0 ciclos úmido/seco: (a) Fibra batida (1200); (b) Fibra não batida (1000)	15
Figura 3 - Fluxograma das principais etapas envolvidas na fabricação do painel cimento: madeira	23
Figura 4 - Principais etapas do ensaio - a) Moinho de facas utilizado para reduzir a granulometria das partículas; b) Betoneira utilizada para homogeneizar os materiais para a formação dos painéis; c) Untagem e preparação dos painéis; Prensa utilizada para comprimir três painéis ao mesmo tempo.....	26
Figura 5 - Dados de mediana e distribuição dos dados envolvidos na análise das propriedades químicas dos resíduos	29
Figura 6 - Dados de mediana e distribuição dos dados envolvidos na análise das propriedades físicas dos resíduos.....	30
Figura 7 - Dados de mediana e distribuição da densidade dos painéis para cada tratamento	31
Figura 8 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x Densidade (g/cm ³).....	32
Figura 9 - Dados de mediana e distribuição da absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis.....	34
Figura 10 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x Absorção de Água - 2H/24H (%)	36
Figura 11 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x Inchamento em espessura - 2H/24H (%).....	37
Figura 12 - Dados de mediana e distribuição da Compressão Paralela (CP) e Tração Perpendicular (TP) para os 05 tratamentos.....	39
Figura 13 - Regressão linear simples - Embalagem de Cimento (%) x CP (MPa).....	41
Figura 14 - Regressão linear simples - Embalagem de Cimento (%) x TP (MPa).....	42
Figura 15 - Dados de mediana e distribuição do Módulo de Elasticidade (MOE) para os 05 tratamentos.....	44
Figura 16 - Regressão linear simples - Embalagem de Cimento (%) x MOE (MPa)	46
Figura 17 - Dados de mediana e distribuição do Módulo de Ruptura (MOR) para os cinco tratamentos.....	47
Figura 18 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x MOR (MPa)	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios típicos da composição de compostos de diferentes tipos de Cimento Portland	17
Tabela 2 - Geração de RCC no município de Orlândia	21
Tabela 3 - Normas utilizadas para a determinação dos constituintes da madeira e da embalagem de cimento	25
Tabela 4 - Ensaio para determinar as propriedades físicas e mecânicas	27
Tabela 5 - Valores médios das propriedades químicas dos resíduos	28
Tabela 6 - Valores médios das propriedades físicas dos resíduos	29
Tabela 7 - Valores médios de massa específica, absorção de umidade e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis	33
Tabela 8 - Pressuposto da ANOVA - normalidade e homogeneidade de AA2H/24H e IE2H/24H.....	35
Tabela 9 - Média da Compressão Paralela à Superfície (CP) e Tração Perpendicular (TP) para efeito de análise das propriedades mecânicas dos painéis.....	38
Tabela 10 - Pressuposto da ANOVA - normalidade e homogeneidade de CP e TP	40
Tabela 11 - Média do módulo de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR) para efeito de análise das propriedades mecânicas dos painéis.....	43
Tabela 12 - Pressuposto da ANOVA - normalidade e homogeneidade dos dados de MOE e MOR	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Painéis de cimento – madeira	12
2.2	Produção de Painéis Cimento – Madeira	12
2.3	Composição dos Painéis Cimento – Madeira	13
2.3.1	Interação Fibra – Matriz Cimentícia	13
2.3.2	Cimento Portland.....	15
2.3.3	Madeira de Eucalipto	17
2.3.3.1	Pesquisas de produção de painéis cimento: madeira com o gênero <i>Eucalyptus</i>	18
2.4	Gestão de resíduos na construção civil	20
2.4.1	Embalagem de cimento	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Obtenção das partículas de madeira.....	24
3.2	Obtenção e preparação das embalagens de cimento	24
3.3	Densidade básica e determinação das propriedades químicas dos materiais lignocelulósicos	25
3.4	Produção dos painéis de cimento: madeira	25
3.5	Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis	26
3.6	Análise Estatística	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1	Análise química das partículas de madeira e de embalagens de cimento	28
4.2	Análise física das partículas de madeira e de embalagens de cimento	29
4.3	Resultado das propriedades físicas dos painéis.....	30
4.3.1	Densidade aparente dos painéis.....	30
4.3.2	Absorção de água e inchamento em espessura.....	32
4.4	Resultado das propriedades mecânicas dos painéis	38
4.4.1	Compressão paralela e tração perpendicular	38
4.4.2	Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática	42
5	CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Estudos de painéis cimento: madeira têm sido desenvolvidos, ao longo dos últimos anos, para propor investigações nas interações de materiais com propriedades distintas, impulsionado por novas legislações que buscam promover o incentivo por produtos ecológicos e de preferência por meio de recursos renováveis. Os materiais vegetais têm despertado grande interesse na formulação de painéis cimento: madeira pela sua disponibilidade, baixo custo, por serem não tóxicos e de fonte renovável, além de se destacarem no que se refere às questões ambientais. Muitos materiais de origem vegetal apresentam potencial, para uso em painéis cimento: madeira, tais como bambu (BHAGAT; BHALLA; WEST, 2021), sisal (NARAGANTI; PANNEM; PUTTA, 2019), cana-de-açúcar (MAHMUD; ANANNYA, 2021) e eucalipto (OKINO *et al.*, 2004).

No campo de espécies de madeira promissoras para a produção de painéis, o Eucalipto se destaca pela área de plantio no Brasil como sendo um dos mais produtivos. O estado de Minas Gerais possui o maior cultivo de eucalipto no país, com 1,9 milhão de hectares (RODRIGUES *et al.*, 2021).

Uma questão que se deve levar em consideração, quando se trata de substituir madeira por resíduo, é que existe uma competição entre vários setores da cadeia de madeira (serrarias, painéis, papel, etc) e que, usando resíduo, poderia reduzir esse impacto. A utilização de resíduos, além de possibilitar a redução do custo do produto final, é uma forma de dar uma destinação correta para um resíduo. Nesse sentido, um resíduo com potencial e grande volume na construção civil são as embalagens de cimento. Esse material é derivado da celulose, composto de papel Kraft e que atrai atenção pela possibilidade de ser utilizado na produção de painéis cimento: madeira, por ser um produto acabado de ótima qualidade com passagem por tratamento de polpação e que, muitas vezes, é queimado nas obras (SALES; CABRAL; MEDEIROS JUNIOR, 2021).

O estudo da associação de fibras híbridas, envolvendo embalagens de cimento e *Eucalipto Grandis*, é justificado pelo interesse em reutilizar o alto volume de embalagens de cimento, em obras que são, muitas vezes, queimadas e que poderiam ter um destino diferente, além da possibilidade de diversificar o mercado atual do corte de madeiras de *Eucalipto Grandis* com foco no setor energético e de papel. Nesse sentido, busca-se desenvolver um produto leve e que atenda ao mercado de painéis de cimento: madeira.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da substituição de diferentes quantidades de madeira por resíduos de embalagens de cimento em painéis de cimento:

madeira. Buscou-se definir a proporção desses resíduos nos painéis cimento: madeira, tendo o processo industrial Bison (1978) como critério para orientar os parâmetros mínimos de exigência às propriedades físicas e mecânicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Painéis de cimento – madeira

Os painéis são compósitos lignocelulósicos que se diferenciam, em relação à natureza da matriz em: orgânica, painéis de fibra ou de partículas, painéis de fibra orientada (OSB), constituída por composto de matriz mineral inorgânica, como: cimento Portland comum (OPC), gipsium e magnésia (KHAN; ABBAS; FARES, 2017).

Entre os diversos tipos de painéis, existe o modelo cimento: madeira que é composto por uma mistura de partículas de madeira e uma matriz inorgânica (cimento), sendo utilizada há mais de 70 anos. É um material com potencial de utilização principalmente em locais em que existe a possibilidade de extração de fibras naturais e que se diferencia pela sua capacidade de suportar ambientes úmidos e com riscos de incêndios. O processo de fabricação desses painéis envolvem adições de outros produtos químicos que possuem aplicabilidade, para o tratamento da madeira, como o cloreto de cálcio que é utilizado para neutralizar a ação da matéria orgânica e melhorar a aderência da fibra ao cimento (TERZIC *et al.*, 2018).

Entre suas aplicações, destacam-se para construções de divisórias de ambientes, pisos, forros, telhados e elemento pré-fabricados na construção (HWANG *et al.*, 2021).

2.2 Produção de Painéis Cimento - Madeira

Os painéis cimento: madeira se diferenciam dos painéis aglomerados pela composição do cimento como aglutinante e o método de prensagem a frio em temperatura ambiente. É um produto com maior destaque na construção civil, em países asiáticos e europeus, tendo como características principais o bom isolamento térmico, acústico e resistência ao fogo (LILGE; HASELEIN; SANTINI, 2021).

O processo de produção dos painéis cimento – madeira consiste em misturar as fibras com a água, podendo ser incorporado nessa etapa cloreto de cálcio para melhor adesão das fibras com o cimento. Em seguida, é adicionado o cimento Portland e, então, todos os componentes são misturados até criar uma pasta homogênea para formar o painel. Os painéis gerados são empilhados e movidos para uma prensa hidráulica a frio por 10 min sob uma determinada pressão para depois serem curados (MEKO; IGHALO, 2021).

2.3 Composição dos Painéis Cimento - Madeira

Os componentes que formam um painel cimento: madeira são relativamente simples: madeira, cimento, água e aditivo químico. O componente responsável pelo reforço dos painéis são as fibras lignocelulósicas, o cimento pela ligação, a água pelas reações e os aditivos por acelerar as reações (ROCHA; MIRANDA; PARCHEN, 2019). Para formular a composição dos painéis cimento – madeira, busca-se recorrer ao método BISON para regular os teores de componentes envolvidos na sua fabricação. A sua mistura é composta por 65% de cimento, 28% de partículas de madeira e 10% de água, resultando em painéis com massa específica em torno de $1,25 \text{ g/cm}^3$ (CASTRO *et al.*, 2018).

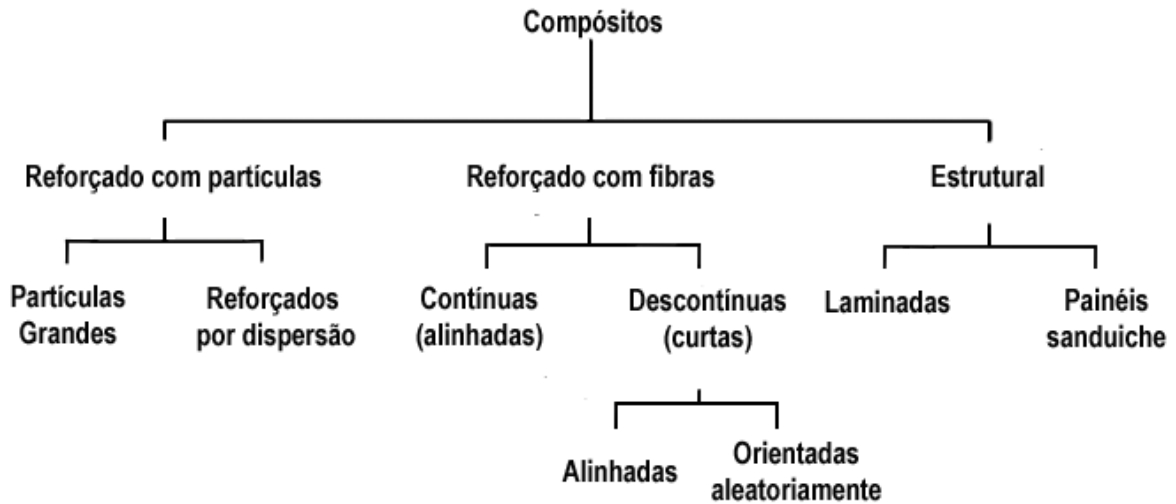
As partículas de fibras incorporadas nos painéis de cimento: madeira são usualmente fibras de sisal (SAHOO *et al.*, 2021), fibras de juta (MAFFEZZOLI *et al.*, 2004), cânhamo (VINOD *et al.*, 2021), Curauá (SALGADO; SILVA, 2021), Eucalyptus Grandis (MEJIA-BALLESTEROS *et al.*, 2021), podendo haver associações de fibras distintas para conferir uma propriedade híbrida.

Os painéis de cimento: madeira possuem em sua composição uma matriz inorgânica que pode ser constituída de gesso, cimento de magnésio ou o cimento Portland, sendo este usualmente utilizado. Recorre-se, muitas vezes, a esse aglomerante por garantir propriedades ao painel que permitem torná-los mais duráveis sem ter problemas caso seja utilizado em ambientes internos ou externos. Essa propriedade é obtida pelos produtos de hidratação: aluminatos de cálcio, silicato de cálcio, cristais de hidróxido de cálcio, etringita (BERGER; GAUVIN; BROUWERS, 2020).

2.3.1 Interação Fibra – Matriz Cimentícia

Ao analisar a composição dos compósitos reforçados com fibras, deve-se considerar que o fator mais importante, nas interações da fibra/matriz, segundo Callister Junior (2019), é aquele em que a fase dispersa está na forma de uma fibra. As fibras incorporadas em um compósito possuem uma determinada concentração e um arranjo ou uma orientação umas em relação às outras que influencia na resistência e/ou rigidez do compósito. De acordo com a Figura 1, é possível identificar diferentes reforços em compósitos (CALLISTER JUNIOR, 2020).

Figura 1 - Esquema de classificação com vários tipos de compósitos

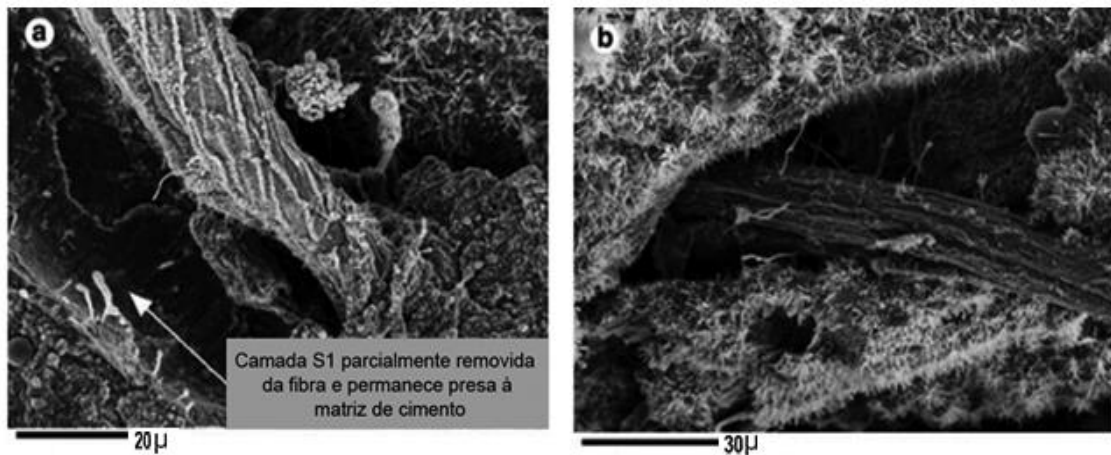


Fonte: Adaptado de Callister Junior (2020).

Ao analisar as propriedades mecânicas das fibras, um cuidado especial deve ser considerado em relação aos feixes. Fibras que possuem grandes vazios se tornam madeiras moles e pouco resistentes. Já em fibras longas os tecidos são ligados fortemente o que confere uma resistência maior à flexão. Uma alta compacidade e rigidez podem ser proporcionadas pela alta concentração de fibras em feixes fortes e, caso haja uma fraca proporção e repartição regular, originam flexibilidade (CALLISTER JUNIOR, 2019).

A interação da fibra – matriz cimentícia – foi observada em um estudo envolvendo MEV com aplicabilidade, em análises de imagens superficiais, para a análise do grau de fraturas de compósitos. Resultados de observações de fibras branqueadas revelaram ter sido separadas em caso de falha, conforme Figura 2, com um comprimento de pull-out, na ordem de 400 a 600 μm , enquanto para as fibras não branqueadas o comprimento de tração das fibras variou de 700 a 900 μm . Esses dados permitiram validar uma ligação mais forte, em relação às fibras branqueadas, por uma maior superfície de área (MOHR; NANKO; KURTIS, 2005).

Figura 2 - Micrografias SEM após 0 ciclos úmido/seco: (a) Fibra batida (1200); (b) Fibra não batida (1000)



Fonte: Adaptado de Mohr, Nanko e Kurtis (2005).

Ao analisar a interação das fibras naturais com a matriz cimentícia, um cuidado maior surge em tratar, previamente, alguns compostos químicos nas fibras que interferem na resistência final do painel cimento: madeira. Esses compostos, conhecidos por extrativos, estão presentes nas fibras e influenciam no retardamento da pega do cimento. Aditivo químico (CaCl_2) é usualmente utilizado no preparo dos painéis, para acelerar a reação e evitar que haja uma perda na velocidade do crescimento de núcleos de cristais, na pasta cimentícia, provocado pelos extrativos (MATOSKI *et al.*, 2013).

A incorporação de aditivos químicos em painéis de cimento: madeira, segundo Frybort *et al.* (2008), é relevante para a qualidade final dos painéis, ao garantir uma aceleração do tempo de pega, além de melhorias nas propriedades físicas da interação entre o material lignocelulósico e a matriz cimentícia. Em sua pesquisa, observou-se que a adição de 3% de CaCl_2 foi capaz de quadruplicar a resistência à flexão do CBPB (painel de partículas unidas com cimento), em comparação com amostras que não receberam a adição desse composto químico.

2.3.2 Cimento Portland

O cimento Portland é constituído, essencialmente, de silicatos e aluminatos de cálcio, obtido a partir da mistura de matérias-primas como calcário e argila. Possui em sua constituição, contemplando os diversos tipos disponíveis no mercado, uma proporção maior de cal, sílica, hematita, alumina, magnésia. O processo de fabricação requer que o calcário (carbonato de cálcio) extraído tenha sua temperatura elevada, para, assim, promover a sua decomposição, na forma de gás carbônico e cal a qual reage com alumina, hematita e sílica, provenientes da argila,

formando assim o clínquer. O clínquer é o principal componente do cimento e, depois de resfriado e moído, recebe adição de gesso para impedir as reações de hidratação entre o cimento e a água ao ser utilizado (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Ainda na fase de moagem do clínquer, adições são incorporadas, para a produção de diferentes tipos de cimento Portland, tais como: escória de alto forno, pozolanas, materiais carbonáceos, entre outros, que resultam em propriedades únicas que influenciam na escolha do cimento a ser utilizado (OSMANOVIC; HARAČIĆ; ZELIĆ, 2018).

No mercado nacional, contamos hoje com as seguintes opções de Cimento Portland: cimento Portland Comum (CP I), cimento Portland composto (CP II), cimento Portland de alto-forno (CP III), cimento Portland pozolânica (CP IV), cimento Portland de Alta Resistência inicial (CP V). Este último é um cimento mais fino, sem adição de escória ou pozolana, utilizada em reparos e reforços de estruturas, tendo alta resistência inicial (PUGLIESI, 2018).

Ao utilizar o cimento nos processos de hidratação, durante uma fase de concretagem ou para outra aplicação que envolva a hidratação do cimento, observa-se que ocorre liberação de calor. O cimento Portland possui, em sua composição, o clínquer que, por sua vez, provém da reação da cal com a alumina, hematita e sílica em proporções controladas. Dessas reações, sob temperatura controlada, resultam os principais produtos de hidratação: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferro aluminato tetracálcico (MARQUES *et al.*, 2016).

Ao analisar os principais componentes responsáveis pela resistência em curto prazo, o silicato dicálcico (C_2S), também conhecido como belita e o silicato tricálcico (C_3S), conhecido como alita, destacam-se. Este tem uma contribuição maior na resistência, durante as primeiras quatro semanas, enquanto o silicato dicálcico (C_2S) influencia no ganho de resistência posterior. A Tabela 1 apresenta a relação de distribuição dos componentes para os diversos tipos de cimento no mercado. Entre os componentes, aquele que mais contribui na liberação de calor e no tempo de pega é o aluminato tricálcico (C_3A). O silicato tricálcico (C_3S), além de contribuir na resistência em curto prazo, é o segundo componente mais importante na produção de calor e do tempo de pega. O ferro aluminato tricálcico (C_4AF) atua como fundente na fabricação do cimento e apresenta-se na forma de solução sólida (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Entre os tipos de cimento apresentados na Tabela 1, o CP V é o mais recomendado para a produção de painéis cimento – madeira, pela maior resistência em curto prazo e pela contribuição no tempo de pega. Aos 28 dias, o cimento já adquire a máxima resistência necessária para iniciar os ensaios mecânicos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Tabela 1 - Valores médios típicos da composição de compostos de diferentes tipos de Cimento Portland

Tipo de cimento	Composição de compostos (%)							Perda ao fogo
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	CaO livre	MgO	
CP I	59	15	12	8	2,9	0,8	2,4	1,2
CP II	46	29	6	12	2,8	0,6	3,0	1,0
CP III	60	12	12	8	3,9	1,3	2,6	1,9
CP IV	30	46	5	13	2,9	0,3	2,7	1,0
CP V	43	36	4	12	2,7	0,4	1,6	1,0

Fonte: Neville e Brooks (2013).

Segundo Beraldo e Carvalho (2004), após ter submetido alguns painéis a tratamentos com diferentes tipos de cimento, verificou-se, durante os ensaios mecânicos, que a substituição do cimento CP-II-E-32 para CP V-ARI gerou um aumento de 100% na resistência à compressão axial do painel.

Embora o CP V tenha uma resistência inicial melhor, a tendência geral é que cimentos com baixa velocidade de endurecimento tenham maior resistência final. Por exemplo, o cimento Portland de baixo calor de hidratação (Tipo IV) tem a menor resistência, aos 28 dias, mas desenvolve a maior resistência aos cinco anos de idade (PALOU *et al.*, 2016).

2.3.3 Madeira de Eucalipto

O Brasil, em 2016, segundo Pena-Vergara *et al.* (2022), possuía uma área florestal plantada essencialmente de eucaliptos ($5,7 \times 10^6$ ha) e pinus ($1,6 \times 10^6$ ha). Em termos de área plantada, nesse mesmo período, o Brasil ocupava a nona posição mundial, embora apenas 0,9% do seu território representasse essa área florestada. Toda essa biomassa produzida gerava ao país, nesse período, 25% de energia primária e 8,2% da eletricidade, tendo como destaque nessa produção as seguintes espécies de árvores: *Eucalyptus saligna*, *E. grandis*, *E. urophylla* e seus clones, *Pinus taeda* e *P. caribea*. Embora o país detivesse uma posição de destaque, no plantio florestal, prevalecia um baixo beneficiamento dos resíduos gerados nos pós- processamento da madeira nas grandes madeiras.

Segundo Pena-Vergara *et al.* (2022), 2,62 m³ de toras são usados, para produzir 1 m³ de madeira serrada nas serrarias, resultando em 38% de madeira e 62% de resíduos. A crescente geração de resíduos, diante do aumento no consumo de madeira serrada, abastece 7,8% da

geração de energia primária, tendo o carvão como produto utilizado pelas indústrias siderúrgicas.

O estado de Minas Gerais possui a maior área de plantio no território brasileiro com mais de 700 espécies naturais, clones de eucalipto e híbridos. Em 2015, foi catalogado 1.596.502,21 hectares plantados de eucalipto distribuídos nas 12 mesorregiões do estado (BORGES; LEITE; LEITE, 2018).

A madeira de eucalipto se destaca como matéria-prima para uso energético e fabricação de celulose e papel. Apesar das empresas florestais concentrarem esforços nesses segmentos, existe um grande potencial em destinar os resíduos gerados do corte das madeiras, para atingir novos mercados, como é o caso dos painéis cimento: madeira. O painel cimento: madeira é um produto que merece destaque na destinação desse recurso, embora alguns cuidados sejam necessários, durante a fase de processamento dos painéis, em razão da qualidade da fibra associada às propriedades mecânicas (BERALDO; CARVALHO, 2004).

As espécies de Eucalipto são mais utilizadas na confecção dos painéis de cimento: madeira, visto que sua seleção é reforçada por características naturais, que dificultam que sejam utilizadas como madeira serrada, mas também, em função de aspectos relacionados à produtividade do plantio, além de propriedades físicas. As rachaduras que se formam nas peças provocadas por tensões de crescimento afetam o rendimento do desdobro, embora hoje existam espécies de *Eucalyptus* geneticamente modificadas que minimizam esses efeitos. A crescente geração de resíduos, diante do aumento no consumo de madeira serrada, é um incentivo para a geração de esforços no segmento de produção de painéis cimento: madeira (BIANCHE *et al.*, 2012).

2.3.3.1 Pesquisas de produção de painéis cimento: madeira com o gênero *Eucalyptus*

O estudo de Semple e Evans (2004) com caules de pequeno diâmetro de *Eucalyptus Mallee* apresentaram resultados satisfatórios na produção de painéis de partículas de cimento (CBPBs), tendo sido demonstrado que a madeira de eucalipto com crescimento rápido pode ser beneficiada na fabricação de chapas de cimento: madeira.

Segundo Beraldo e Carvalho (2004), após análises estatísticas de resultados obtidos de ensaios de compressão axial, verificou-se, entre as amostras de painéis de cimento: madeira com seleção de fibras de *Eucalyptus grandis*, uma alta influência das seguintes variáveis, no valor na tensão de compressão: corte/uso, tipo de cimento, idade da tora, posição da amostra,

pois a variável que representa o pré-tratamento com água quente não apresentou efeito significativo.

Propriedades relacionadas à densidade da madeira, produtividade de áreas plantadas, adaptação ao ambiente local com possibilidade de pronto uso das florestas, resumem alguns fatores que influenciam na decisão de recorrer ao *Eucalyptus grandis*, como espécie selecionada à produção de painéis de cimento: madeira. É uma madeira com uma densidade um pouco mais elevada e, por isso, possui uma porosidade menor que garante uma redução da penetrabilidade do adesivo durante a formação do colchão. Essa espécie tem sido ainda utilizada, em pequena escala, na produção de madeira serrada (IWAKIRI *et al.*, 2007).

Castro *et al.* (2015) avaliaram o potencial do uso de diferentes aditivos químicos, como o cloreto de cálcio (CaCl_2) e cloreto de magnésio (MgCl_2), com base em métodos de formação na produção de painéis de cimento: madeira utilizando um clone do *Eucalyptus saligna*. Os resultados gerados indicaram que a adição de 3% de aditivo químico (cloreto de cálcio e de magnésio), em relação à massa do cimento, proporcionou incremento nos valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos painéis de *E. saligna* e cimento.

Rosa *et al.* (2017) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de painéis cimento: madeira, utilizando os seguintes materiais lignocelulósicos: *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunni*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urograndis*. Para tanto, recorreu ao CP II-Z 32R com uma taxa de 2% de (CaCl_2) em relação ao peso do cimento. Os painéis produzidos possuíam uma densidade média, na faixa de 0,97 g/cm³ a 1,02 g/cm³, para os diferentes tratamentos, estando abaixo da densidade comercial igual a 1,250 g/cm³, segundo a Norma IS (NATIONAL STANDARDS BODY OF INDIA - NSBI, 1995). As partículas de fibras maiores adotadas impactaram negativamente nos resultados das propriedades físicas, ao dificultar o processo de compactação, além de não garantir uma boa aderência entre as fibras e o cimento por má regulação do teor de água/cimento.

Mendes *et al.* (2011) utilizaram clones de *Eucalyptus urophylla* com oito anos de idade, para melhor avaliar o potencial de utilização dessa espécie, na associação de painéis cimento: madeira. Verificaram que os painéis com associação do *Eucalyptus urophylla*, em termos de propriedades físicas, apresentavam valores inferiores aos da madeira de *Pinus oocarpa*; as diversas amostras de clones de *Eucalyptus* apresentaram menores valores de inchamento em espessura, enquadrando nas exigências mínimas do processo de Bison Wood-Cement Board (BISON, 1978).

2.4 Gestão de resíduos na construção civil

Em 2020, segundo dados divulgados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), houve um crescimento de 5,5% na geração de resíduos da construção e demolição (RCD) no Brasil. Foi catalogado um total de 47 milhões de toneladas no país, posto que a região Sudeste se destacou com um percentual de 52% e a região Centro-Oeste com uma maior coleta per capita, quase 319 kg de RCD por habitante/ano.

O setor da construção civil é responsável pela geração de um grande volume de resíduos e, muitas vezes, a disposição final é realizada de forma inadequada. Diante da necessidade de reduzir os impactos gerados por uma má gestão dos resíduos, foi aprovada, em 2002, a Resolução nº 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2022). A partir dessa Resolução, definiram-se diretrizes, critérios e procedimentos ao poder público e também aos geradores de resíduos para destinar corretamente os resíduos oriundos da construção civil (GONÇALVES *et al.*, 2017).

A resolução nº 307/2002 exige do poder público municipal a elaboração de leis, decretos, portarias e outros instrumentos legais, como parte da construção da política pública, que discipline a destinação dos resíduos da construção civil (CORREA; SGUAREZI; MELO, 2022). Segundo Medeiros *et al.* (2015), embora seja fundamental que haja uma fiscalização pública nas empresas, para garantir uma adequada separação dos resíduos gerados no canteiro, infelizmente, ainda é comum em municípios situações em que os resíduos são misturados, prejudicando uma correta reutilização e/ou reciclagem.

A gestão adequada dos resíduos, oriundos da indústria da construção civil, deve ser tratada pelo município por intermédio de um inventário, ou seja, uma quantificação por categoria de resíduos especificados na Resolução nº 313/2002 (BRASIL, 2002). O município, por meio do Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, é responsável por elaborar, coordenar e implementar diretrizes técnicas envolvidas no sistema de limpeza urbana local, sendo fundamental que as empresas exerçam suas responsabilidades (SILVA, 2007).

Em 2010, foi sancionada a Lei nº 12305 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Considerado um marco para a questão ambiental, ao reforçar a Resolução 307/02, essa lei definiu a responsabilidade dos agentes e a relação de destinação ou reciclagem dos resíduos. Além disso, reforçou a ordem de prioridade na gestão e gerenciamento dos

resíduos, conforme segue: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final (BRASIL, 2010).

No município de Orândia, São Paulo, foi feito um estudo, para avaliar o potencial de reciclagem dos resíduos da construção civil (RCC) coletados e, de acordo com a Tabela 2, identificou-se uma predominância por resíduos minerais. Obsevou-se que 97% dos resíduos são recicláveis como agregados, dado que as embalagens de papel Kraft utilizadas, para armazenar o cimento e cal, representaram 1% em peso do total de resíduo gerado.

Tabela 2 - Geração de RCC no município de Orândia

Resíduos	%
Concreto	40,187
Argamassa	14,800
Tijolo	11,500
Sacos de Papel	1

Fonte: Adaptado de Marques e Córdoba (2020).

As soluções que envolvem a reutilização e reciclagem dos resíduos gerados devem se enquadrar, em programas municipais específicos, conforme Lei nº 12305:2010 (BRASIL, 2010). Diante da eliminação de lixões e o incentivo por políticas de inclusão social, buscou-se por uma economia de recursos naturais. Entre os resíduos, as embalagens de cimento se destacam por ser um material leve e fácil de ser transportado por catadores nas obras e, embora representem menor proporção em peso dos RCC, conforme Tabela 2, são interessantes e devem ser priorizados pelo Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil por envolver uma política de inclusão social (MARQUES; CÓRDOBA, 2020).

O incentivo pela coleta de embalagens de cimento são reforçadas pela possibilidade de desenvolver painéis de cimento:madeira. É uma alternativa que busca não só a coleta do resíduo, mas também o seu beneficiamento, ao ser reutilizado em um produto compatível com o rigor de qualidade exigida pelo mercado (CORREA; SGUAREZI; MELO, 2022).

2.4.1 Embalagem de cimento

A tecnologia envolvida na confecção das camadas multifoliadas das embalagens de cimento obtidas pela extração de fibras celulósicas de pinheiros e eucaliptos surge como uma possibilidade, para preservar a qualidade do cimento, em relação ao meio externo, diante da possibilidade de desenvolver até 06 folhas de papel Kraft. A qualidade do papel permite que o cimento não seja violado, durante o processo de enchimento ou mesmo durante o transporte e que a umidade externa não afete o cimento. As embalagens de papel Kraft garantem uma resistência a elevadas temperaturas, em que o cimento é despejado, além da própria resistência mecânica (SALES; CABRAL; MEDEIROS JUNIOR, 2021).

A sua resistência mecânica é garantida pela disposição das fibras e da qualidade de suas propriedades que variam pela forma estrutural, tamanho e pureza (MÁRMOL *et al.*, 2013). A utilização de partículas de embalagens de cimento, constituído de papel Kraft, é uma alternativa que tem sido empregada na confecção de painéis cimento: madeira, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental, por serem um material sustentável, além de resolver o problema das reservas florestais, à medida que 96 milhões de sacos são produzidos por ano no Brasil (PENNA, 2021).

Na tentativa de reutilizar as embalagens de cimentos, compósitos são estudados com a incorporação dessa fibra em taxas controladas. Os painéis cimento: madeira surgem como uma opção e, segundo Sales (2017), demonstram ser promissores ao serem incorporados com resina de ureia-formaldeído. Os resultados demonstram uma resistência mecânica média de 465,5 MPa (MOE), 16,3 MPa (MOR) para um dos tratamentos realizados.

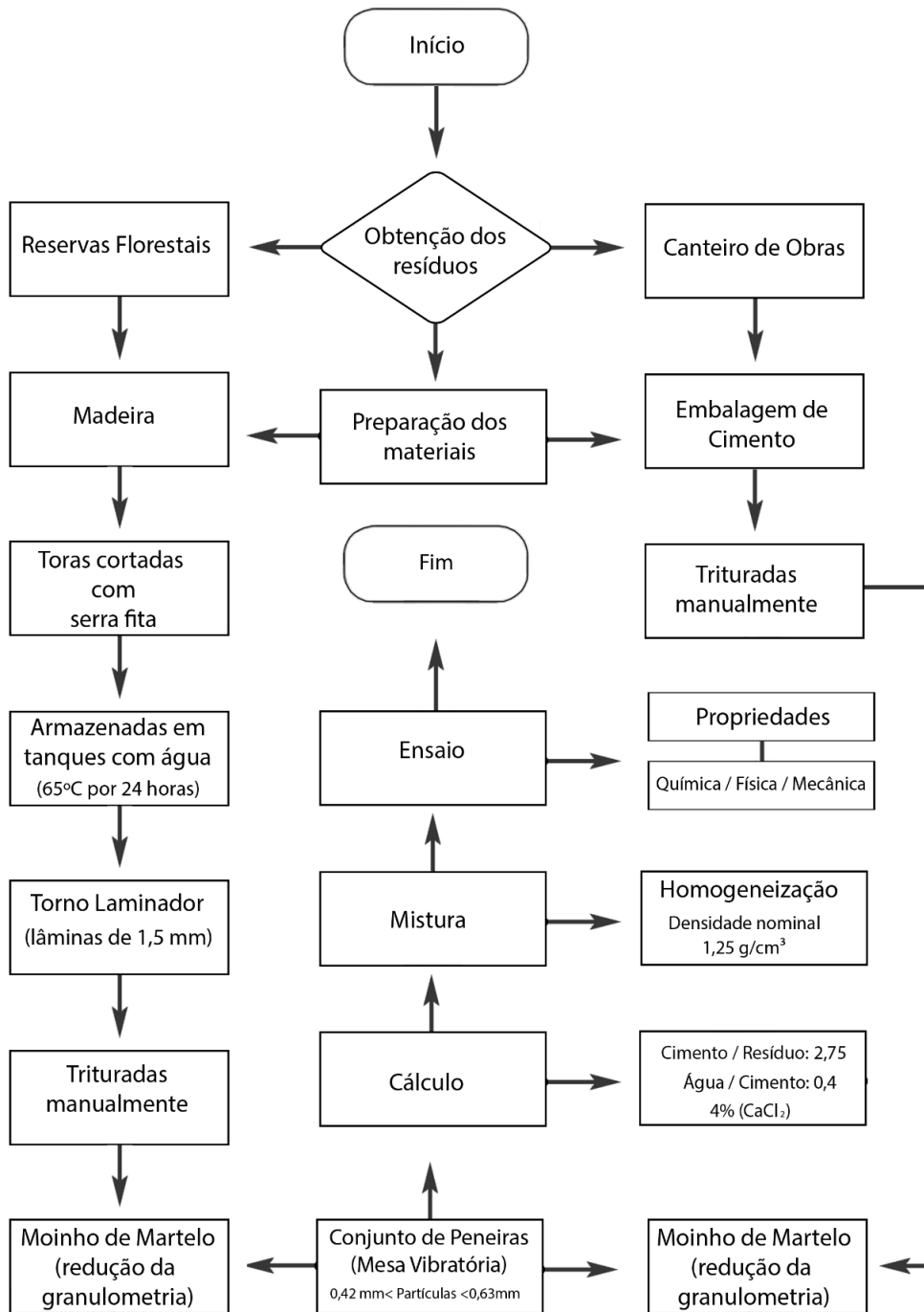
As embalagens de cimento têm sido reutilizadas também como componente importante na fabricação de blocos solo cimento. As vantagens são perceptíveis, em níveis controlados de papel Kraft, que garantem benefícios nas propriedades mecânicas de compressão, além de reduzir o consumo de cimento (SANTOS, 2020).

Santos, Cristina e Ribeiro (2022) avaliaram a possibilidade de desenvolver argamassas com incorporação de partículas de embalagens de cimento. A reutilização desse resíduo obtido em obras possui algumas restrições em função do clima da região.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 3 podem-se observar as etapas realizadas para a produção dos painéis.

Figura 3 - Fluxograma das principais etapas envolvidas na fabricação do painel cimento: madeira



3.1 Obtenção das partículas de madeira

As árvores de *Eucalyptus grandis*, utilizadas neste estudo, foram obtidas de um plantio experimental, em uma área de reserva dentro do Campus da UFLA e encaminhadas para desdobro, na serraria do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras. As toras foram cortadas em uma serra de fita e armazenadas em um tanque, contendo água à temperatura de 65°C por 24 horas, para promover o cozimento e, conseqüentemente, o “amolecimento” da madeira para facilitar o processo de laminação.

As toras foram seccionadas e depois laminadas, em um torno laminador, obtendo lâminas de 1,5 mm de espessura, que foram posteriormente rasgadas manualmente e processadas, em moinho martelo com peneira de 0,63 mm de abertura, para a geração das partículas. Após, as partículas geradas foram peneiradas com um conjunto de peneiras sobrepostas, em uma mesa vibratória, para efeito de separar as partículas maiores e o material fino gerado. A abertura da peneira superior utilizada foi de 0,63 mm e a inferior de 0,420 mm. Dessa forma, as partículas com granulometria, no intervalo de 0,420 mm a 0,63 mm, foram destinadas à produção dos painéis e, também, à caracterização química e física do material lignocelulósico. Após a classificação, as partículas obtidas foram lacradas, em um saco plástico, até o momento de processamento dos painéis.

3.2 Obtenção e preparação das embalagens de cimento

A embalagem de cimento utilizada neste trabalho é da marca Cauê e foi coletada em obras dentro do campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Após a coleta, as embalagens de cimento foram encaminhadas para a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM).

As embalagens de cimento foram trituradas manualmente, tendo o cuidado de remover qualquer impureza em sua superfície com uma escova. Após esse processo, reduziu-se novamente a granulometria dos resíduos, com o auxílio de um moinho de martelo, seguindo a mesma relação das aberturas das peneiras utilizadas para o resíduo madeira.

3.3 Densidade básica e determinação das propriedades químicas dos materiais lignocelulósicos

O cálculo da densidade básica dos materiais lignocelulósicos utilizados neste estudo foi realizado de acordo com as especificações da norma da ABNT – NBR 11941:2003 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

Para a análise química, os materiais lignocelulósicos sofreram um processo de moagem, para a diminuição das suas dimensões, sendo transformadas em serragem, por meio de um moinho de facas, para facilitar a penetração e a ação dos reagentes químicos, seguindo as normas conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Normas utilizadas para a determinação dos constituintes da madeira e da embalagem de cimento

TEOR	NORMAS
Extrativos totais	NBR 14660 (ABNT, 2004)
Lignina insolúvel	T222 om-06 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP & PAPER INDUSTRY - TAPPI, 2006)
Cinzas	T211 om-07 (TAPPI, 2007)
Holocelulose	por diferença

Fonte: Do autor (2022).

3.4 Produção dos painéis de cimento: madeira

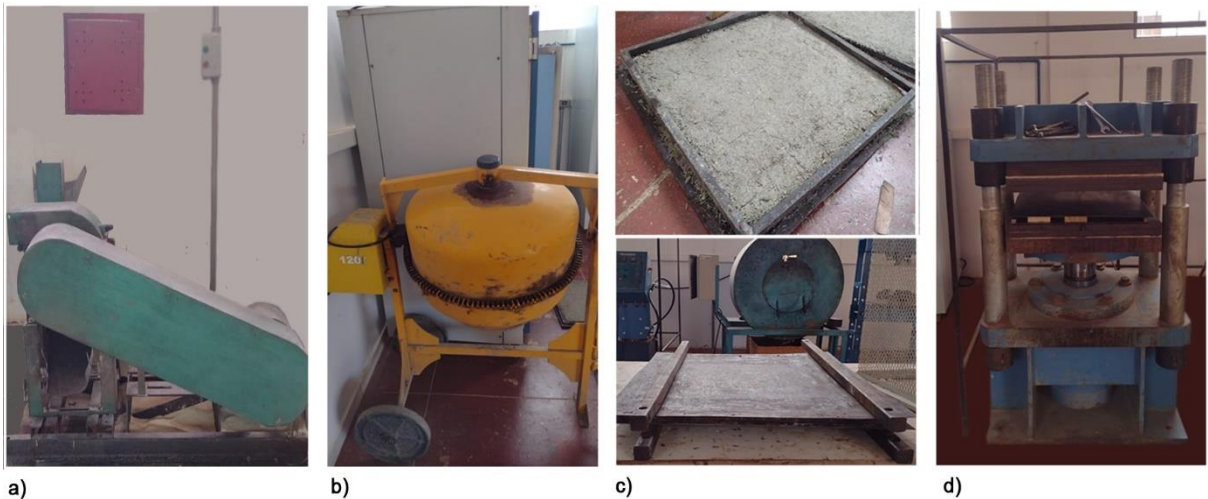
Para a formação dos painéis, determinou-se o peso de cada um dos seguintes componentes: partículas de madeira, cimento, água e cloreto de cálcio. Adotaram-se os seguintes critérios envolvidos, na relação das proporções dos componentes utilizados, para compor os painéis com uma densidade nominal igual a 1,25 g/cm³: relação madeira: cimento de 1:2,75; fator água: cimento de 0,25 e 4% de cloreto de cálcio em relação à massa do cimento. Em relação às dimensões dos painéis, adotou-se uma largura, comprimento e espessura de 50cm x 50cm x 1,5cm, respectivamente.

Após a pesagem de cada um dos componentes envolvidos na fabricação do painel, eles foram misturados com o auxílio de uma betoneira para a obtenção de uma massa homogênea. Após essa massa ter sido retirada da betoneira, prosseguiu-se à pesagem dessa massa, para compor três painéis e distribuí-los aleatoriamente em placas de alumínio formadoras do

colchão. As placas foram previamente untadas com óleo diesel, para facilitar a retirada do painel, após sua prensagem e grampeamento. O controle da espessura dos painéis foi determinado por barras de ferro com espessuras de 1,5cm.

Para o carregamento dos painéis, a prensa foi fechada com pressão específica de 4,0 MPa e temperatura ambiente, realizando-se, em seguida, o grampeamento dos painéis, ao qual permaneceram por um período de 24 horas. Após esse período, os grampos foram retirados, e os painéis foram acondicionados em câmara climatizada à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 3\%$, durante 28 dias, sendo então realizados os ensaios das propriedades físicas e mecânicas dos painéis. A Figura 4 retrata as principais etapas e a relação dos equipamentos necessários para produzir os painéis cimento: madeira.

Figura 4 - Principais etapas do ensaio - a) Moinho de facas utilizado para reduzir a granulometria das partículas; b) Betoneira utilizada para homogeneizar os materiais para a formação dos painéis; c) Untagem e preparação dos painéis; Prensa utilizada para comprimir três painéis ao mesmo tempo



Fonte: Do autor (2022).

3.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

As propriedades físicas e mecânicas dos painéis cimento: madeira foram avaliadas, por meio de análises estatísticas, dados esses obtidos, após realização dos ensaios informados na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios para determinar as propriedades físicas e mecânicas

TESTES	NORMAS
Absorção de água e inchamento em espessura	ASTM D1037 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2020)
Flexão estática (MOR e MOE)	DIN 52362 (GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDISATION - DIN, 1965)
Tração perpendicular	ASTM D-1037 (ASTM, 2020)
Compressão paralela	ASTM D-1037 (ASTM, 2020)

Fonte: Do autor (2022).

3.6 Análise Estatística

Para prosseguimento nas análises dos dados extraídos dos ensaios físicos e mecânicos, inicialmente, foi feita uma inspeção dos resíduos dos tratamentos e uma prévia verificação da normalidade e homogeneidade dos dados, por meio do teste de (Shapiro-Wilk) e (Bartlett), respectivamente, com o auxílio dos seguintes pacotes internos do Rstudio: datasets, ggplot2, multcomp, dplyr (SILVA *et al.*, 2022). Segundo Zuur *et al.* (2010 *apud* SILVA *et al.*, 2022), a inspeção gráfica da distribuição dos resíduos permite realizar análises de normalidade e homogeneidade da variância envolvendo teste T, ANOVA e regressões simples e múltiplas.

Adotaram-se os resultados da análise de variância (ANOVA) pelo modelo de teste de hipóteses, com o auxílio do software Sisvar e Rstudio e, quando significativa, realizou-se análise de regressão a 5% de significância. Nessa análise, a taxa de embalagem de cimento (plotada no eixo-X) e a variável resposta (plotada no eixo Y) compõem uma função na qual se busca explicar pelo coeficiente de determinação R^2 a proporção de variação de Y em relação a X.

Para identificar grupos que apresentam diferenças significativas entre as médias, testes post-hoc (teste de tukey) contribuem nessa verificação, embora, para este estudo, tenha sido dispensado esse recurso, ao plotar o gráfico boxplot com auxílio do software Rstudio. Este gráfico auxilia qualitativamente e de forma prática, por uma inspeção visual a verificar as diferenças significativas dos grupos pela distribuição dos dados, visto que o coeficiente de variação foi adotado como outro recurso, para melhor avaliar a variação dos dados, em relação à média de cada grupo (SILVA *et al.*, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise química das partículas de madeira e de embalagens de cimento

Os resultados da análise química, conforme Tabela 5, revelaram uma média do percentual de extrativos totais para a madeira *Eucalyptus grandis* igual a 6,4%. Este percentual está acima do valor encontrado na literatura, conforme valor médio de 4,6% obtido no estudo de Silva (2002).

Tabela 5 - Valores médios das propriedades químicas dos resíduos

Resíduos	Teor de Cinzas (%)	Extrativos Totais (%)	Teor de Lignina (%)	Holocelulose (%)
Madeira	0,23	6,4	24,6	69
Embalagem de Cimento	6,3155	0,2130	7,3829	92,4041

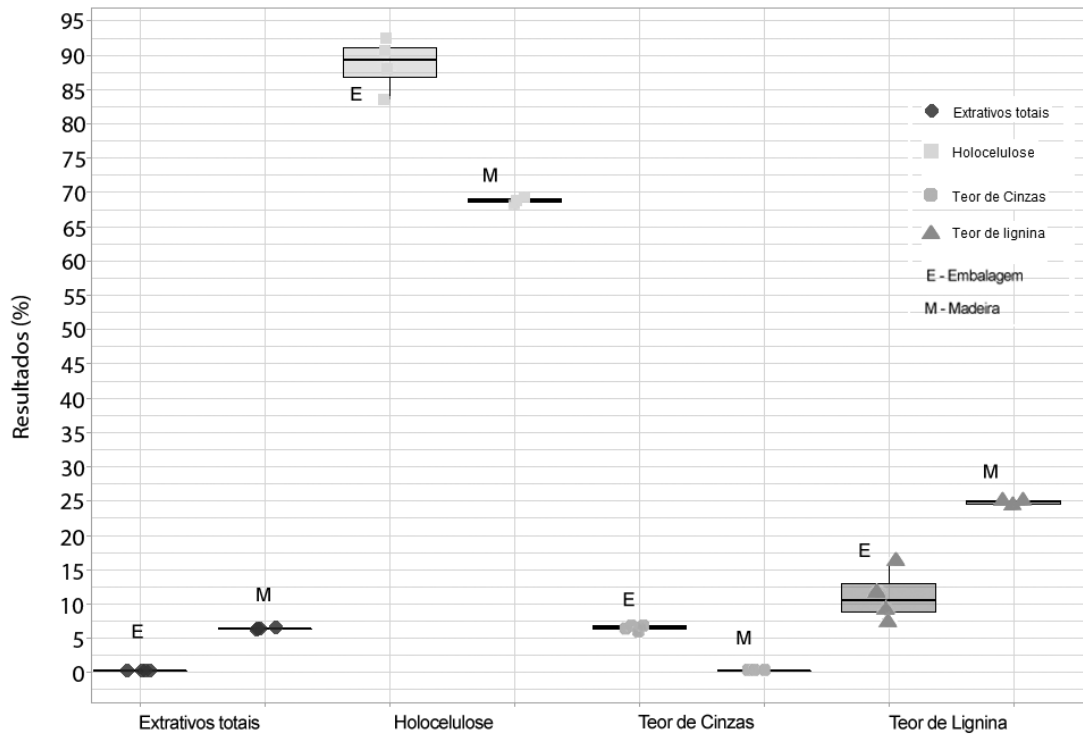
Fonte: Do autor (2022).

Já em relação aos resultados das análises químicas das fibras de embalagem de cimento, verificou-se um percentual de 0,2130%, para os extrativos totais, valor este inferior ao resíduo da madeira, conforme Tabela 5. Esse baixo percentual auxilia no crescimento dos núcleos de cristais responsáveis pelo ganho de resistência inicial, na pasta cimentícia dos painéis e é explicado pelo processo de fabricação das embalagens de cimento que recorre ao pré-tratamento de polpação das fibras para reduzir os índices de extrativos.

As embalagens de cimento também apresentaram resultados inferiores à madeira, para o ensaio de teor de lignina, composto este que, segundo Karimah *et al.* (2021), influencia positivamente no ganho de umidade e na tensão de falha dos painéis cimento: madeira.

A distribuição dos dados das propriedades químicas, para ambos os resíduos analisados, foi informada na Figura 5. Verificou-se um percentual superior, para o resíduo madeira, em relação aos teores de extrativos totais e de lignina, pois a embalagem de cimento apresentou um percentual maior para holocelulose e teor de cinzas.

Figura 5 - Dados de mediana e distribuição dos dados envolvidos na análise das propriedades químicas dos resíduos



Fonte: Do autor (2022).

4.2 Análise física das partículas de madeira e de embalagens de cimento

Ao analisar as propriedades físicas da madeira e da embalagem de cimento, identificou-se uma diferença na densidade básica entre os resíduos de 20,26%, sendo a madeira superior com um valor de 0,457 g/cm³, conforme a média dos dados informados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores médios das propriedades físicas dos resíduos

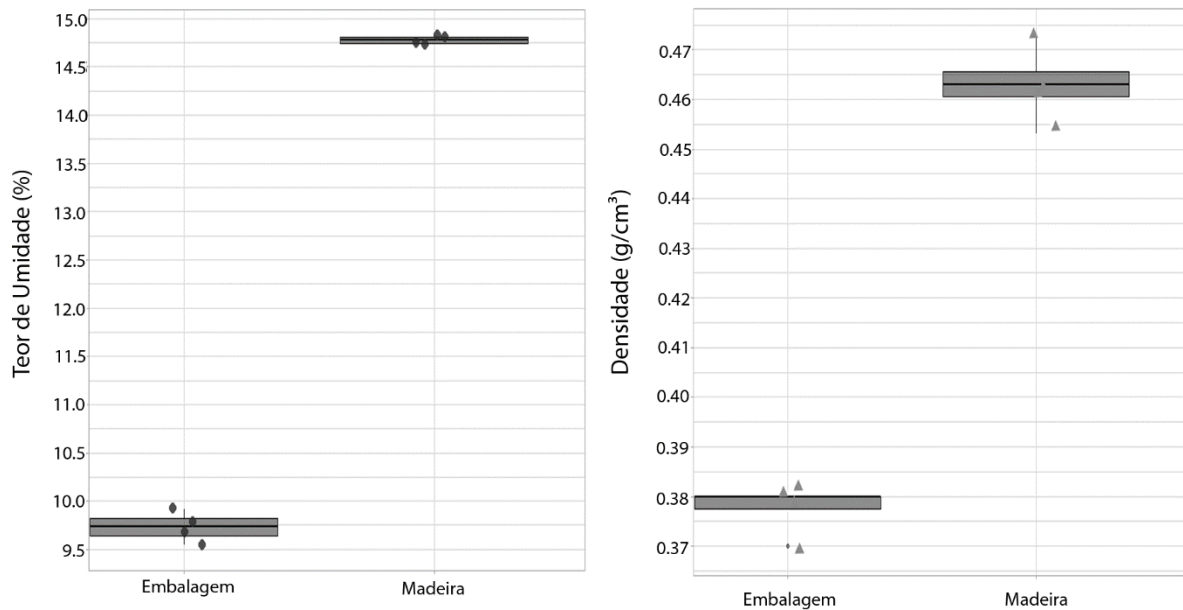
Resíduos	Teor de umidade (%)	Densidade (g/cm ³)
Madeira	14,73	0457
Embalagem de Cimento	9,7496	038

Fonte: Do autor (2022)

Ainda, segundo a Tabela 6, a madeira apresentou um teor de umidade superior à embalagem de cimento em, aproximadamente 50%. Os resultados obtidos para a madeira estão em conformidade com os estudos realizados por Ricardo *et al.* (2015).

A distribuição dos dados das propriedades físicas, para ambos os resíduos analisados, foi informada na Figura 6. Entre os dois resíduos analisados, verificaram-se valores superiores ao resíduo madeira em relação ao teor de umidade e densidade.

Figura 6 - Dados de mediana e distribuição dos dados envolvidos na análise das propriedades físicas dos resíduos



Fonte: Do autor (2022).

4.3 Resultado das propriedades físicas dos painéis

Nos próximos tópicos serão apresentados os resultados físicos dos ensaios de densidade aparente, inchamento em espessura e absorção de água dos painéis.

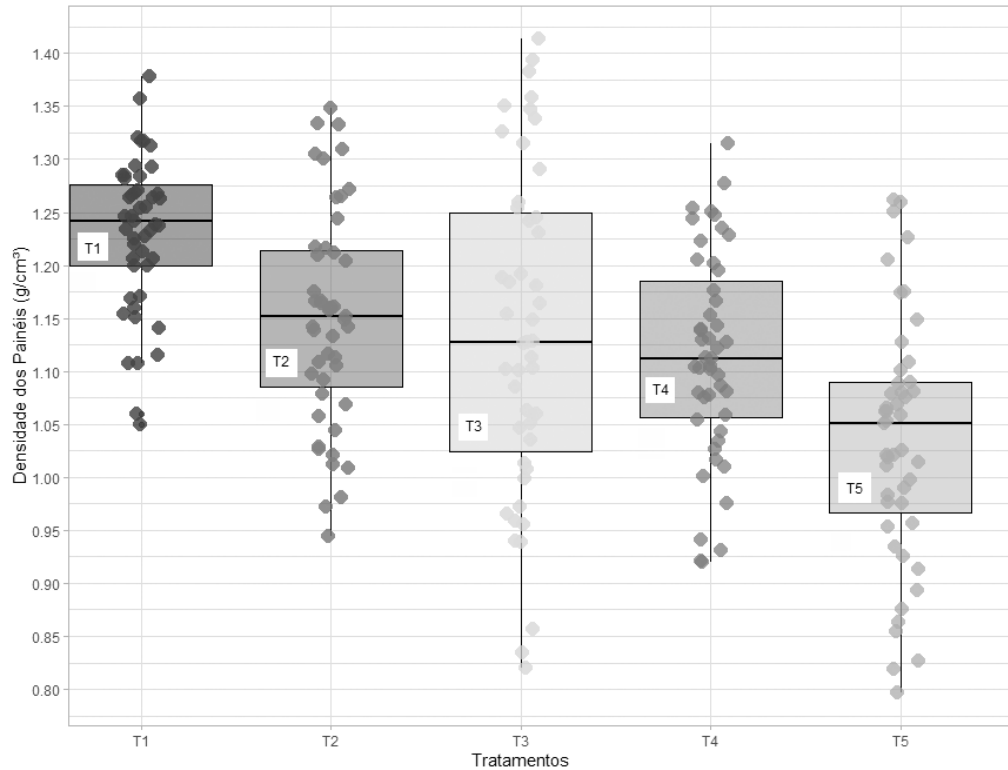
4.3.1 Densidade aparente dos painéis

Foi observada, após a produção dos 15 painéis envolvidos nos cinco tratamentos, uma variação na densidade de 1,034 g/cm³ a 1,231 g/cm³. Embora os painéis tenham sido produzidos para terem uma densidade igual a 1,25 g/cm³, verificou-se essa margem de variação pela dificuldade em homogeneizar os materiais que compõem o painel.

O gráfico de caixa, também conhecido como boxplot, foi utilizado para sintetizar informações relevantes de análises de dados contínuos, como a mediana e a distribuição dos dados com seus outliers, conforme Figura 7. Para efeito de análise da homogeneidade das

densidades obtidas, foram informados, abaixo da Figura 7, os coeficientes de variação que indicam a variação dos dados em relação à média.

Figura 7 - Dados de mediana e distribuição da densidade dos painéis para cada tratamento



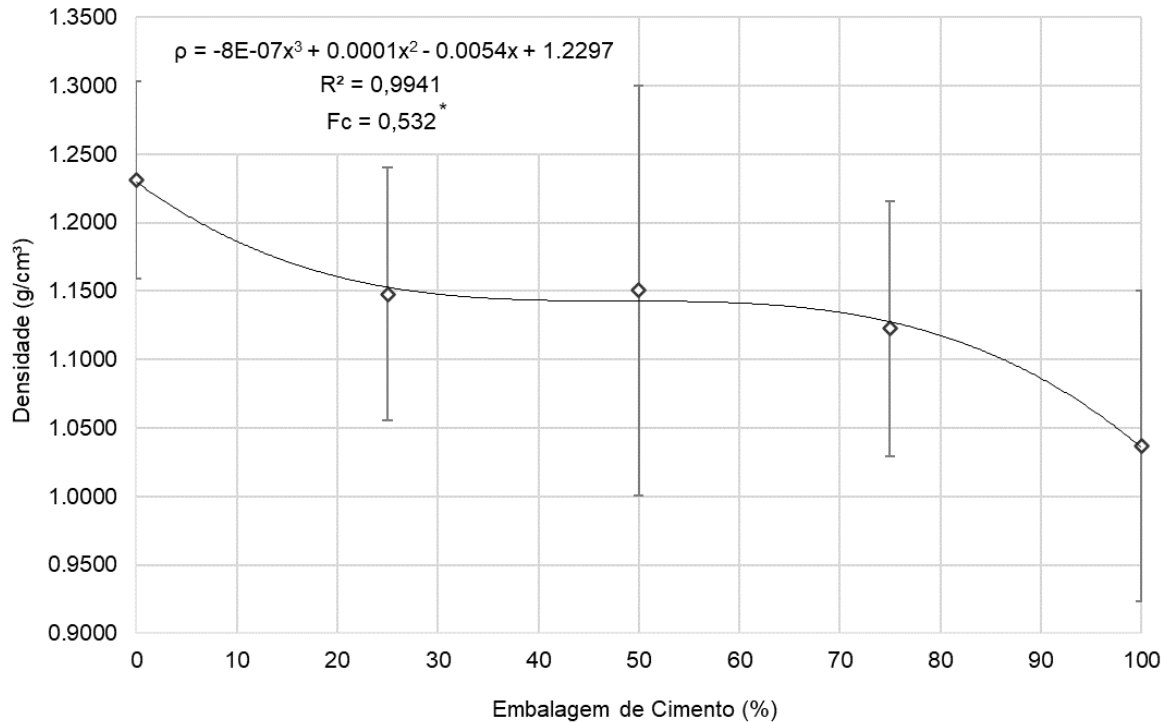
Legenda: C.V. (Coeficiente de Variação (%)): Densidade (g/cm^3) - (T1) = 5,86%; (T2) = 8,89%; (T3) = 13,68%; (T4) = 8,73%; (T5) = 11,24%.

Fonte: Do autor (2022).

Embora tenha sido verificada uma densidade inferior à prevista inicialmente no preparo dos painéis, ainda assim, segundo Bison (1978), valores de densidade próximos a $1,1 \text{ g/cm}^3$ possuem aplicabilidade industrial. À medida que aumentou a substituição de embalagens de cimento, a densidade dos painéis diminuiu por problemas relacionados à trabalhabilidade de sua produção em condicionar uma plena compactação das partículas de embalagem de cimento sem formação de vazios internos.

Verificou-se um efeito significativo da porcentagem de embalagem de cimento em substituição à madeira, em relação à densidade dos painéis, conforme Figura 8. A gradual substituição de partículas de embalagem de cimento influenciou na redução da densidade do painel, embora, no intervalo compreendido de 30 a 60% de embalagem de cimento, tenha sido observada uma densidade constante em torno de $1,15 \text{ g/cm}^3$, conforme a função da regressão na Figura 8.

Figura 8 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x Densidade (g/cm³)



Legenda: * – Significativo a 5%.

Fonte: Do autor (2022).

O tratamento envolvendo a substituição de 50% de embalagem de cimento apresentou uma dispersão maior dos dados. O alto coeficiente de variação (13,68%) obtido é justificado, inclusive, pela alta taxa de outliers observadas na Figura 7, sendo um indicador de não homogeneidade na fabricação dos painéis para a propriedade densidade analisada. Os painéis produzidos com uma substituição de até 25% de embalagem de cimento demonstraram melhores resultados, em termos de dispersão dos dados de seus painéis, para a propriedade densidade analisada, conforme os coeficientes de variação informados abaixo da Figura 7.

4.3.2 Absorção de água e inchamento em espessura

Na Tabela 7 constam os valores médios calculados para a massa específica, adsorção de água em 2 e 24 horas de imersão e do inchamento em espessura em 2 e 24 horas dos painéis. Os painéis fabricados sem substituição de embalagens de cimentos (T1) apresentaram a menor taxa de absorção de água e inchamento. Embora substituições de partículas de embalagem de cimento tenham contribuído na absorção e inchamento dos painéis, verificaram-se taxas inferiores para T3 em comparação com o tratamento anterior T2 que possui um percentual

menor de embalagem de cimento na composição do painel. Os painéis fabricados com a máxima substituição de embalagem de cimento, identificados pelo tratamento T5, apresentaram as maiores taxas de absorção e inchamento após 24h, iguais a 37% e 4,03%, respectivamente.

Tabela 7 - Valores médios de massa específica, absorção de umidade e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis

Tratamento	Massa específica (g/cm ³)	Absorção 2h (%)	Absorção 24h (%)	Inchamento 2h (%)	Inchamento 24 (%)
1	1,231 ± 0,072	10,04	13,99	0,41	0,54
2	1,150 ± 0,102	13,29	18,29	1,07	1,375
3	1,135 ± 0,155	12,134	17,70	0,471	0,923
4	1,114 ± 0,097	25,287	27,691	1,76	2,23
5	1,034 ± 0,116	34,95	37,00	3,80	4,03

Fonte: Do autor (2022).

Nota: C.V. (Coeficiente de Variação): (Absorção de água 2h/24h) - (T1) = 26,00% / 14,82%; (T2) = 32,68% / 20,63%; (T3) = 34,19% / 21,21%; (T4) = 15,249% / 13,92%; (T5) = 9,72% / 8,62%.
C.V. (Coeficiente de Variação): (Inchamento em espessura 2h/24h) - (T1) = 27,54% / 16,33%; (T2) = 32,66% / 21,96%; (T3) = 66,68% / 39,86%; (T4) = 13,12% / 17,790%; (T5) = 9,08% / 10,53%.

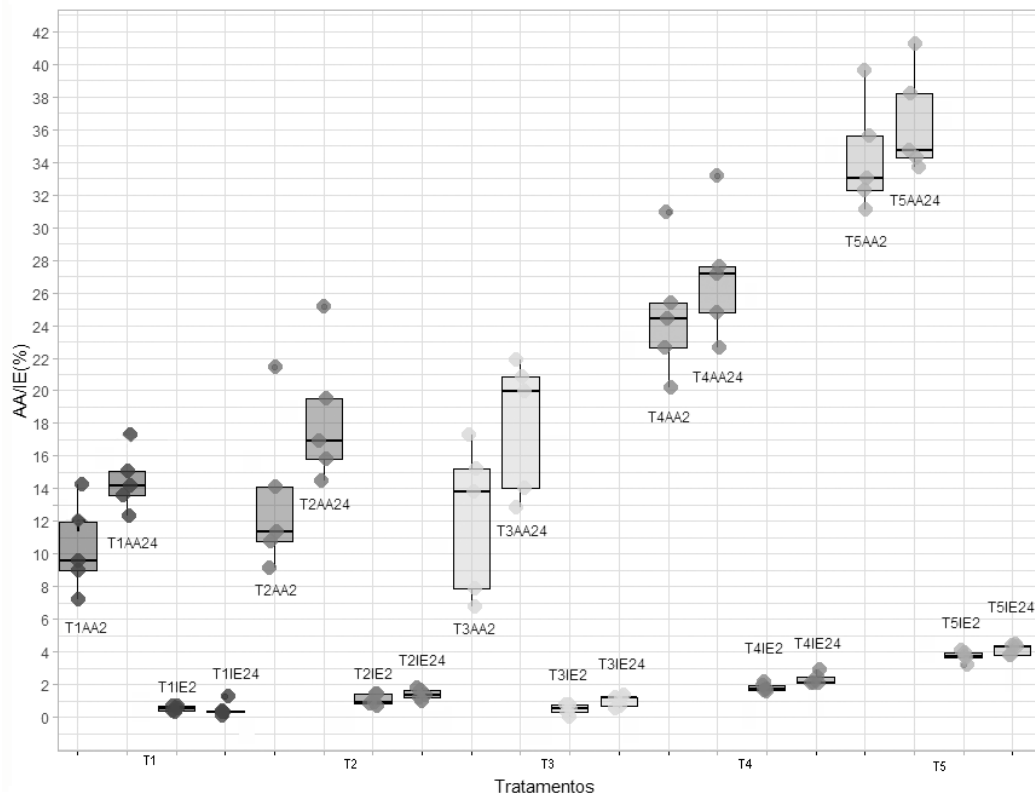
Abaixo da Tabela 7 foram informados os coeficientes de variação das propriedades físicas analisadas nos painéis. O tratamento envolvendo a substituição de 50% de embalagem de cimento apresentou uma homogeneidade inferior, na composição dos painéis (21,21%/39,86%), entre os cinco tratamentos para os ensaios AA24H e IE24H, respectivamente. Esse resultado expressa uma alta dispersão dos dados e a dificuldade em definir com maior precisão a taxa de absorção de água e inchamento em espessura para essa faixa de embalagem de cimento.

Para o tratamento T1 sem substituição de embalagem de cimento, foi verificada uma média de inchamento em espessura (2h e 24h) iguais a 0,41% e 0,54%, respectivamente. Já para T5 com a máxima substituição de embalagem de cimento, verificou-se um aumento na média de inchamento em espessura de 3,8% e 4,03% dos corpos de prova, após imersão em água por um período de 2h e 24h, respectivamente. De acordo com o processo industrial BISON, procura-se produzir painéis que, de acordo com ensaio de inchamento em espessura, após 2 e 24 horas, tenha como resultado uma média inferior ou igual a 1,2 e 1,8%, respectivamente. Nesta condição, apenas os painéis envolvendo os tratamentos T4 e T5 não foram aceitos.

O gráfico de caixa, também conhecido como boxplot, foi utilizado, para sintetizar informações relevantes de análises de dados contínuos, como a mediana e a distribuição dos

dados, para ambos os testes físicos (AA e IE) na Figura 9. O gráfico informa uma não homogeneidade dos dados explicada, principalmente, pela distribuição dos dados, além dos coeficientes de variação informados abaixo da Tabela 7.

Figura 9 - Dados de mediana e distribuição da absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis



Legenda: AA2 = Absorção de água (2 horas); AA24 = Absorção de água (24 horas); IE2 = Inchamento em espessura (2 horas); IE24 = Inchamento em espessura (24 horas).

Fonte: Do autor (2022).

O tratamento T1 seguido pelo tratamento T3 geraram menores taxas aos ensaios AA/IE, sendo altamente recomendado, para os tratamentos T4 e T5, um melhor controle da higroscopicidade dos painéis por um tratamento hidrófugo.

Iwakiri *et al.* (2012 *apud* IWAKIRI *et al.*, 2015), em testes com painéis cimento: madeira de paricá e embaúba, obtiveram valores de absorção de água, após 24 horas, na faixa de 23,22% a 25,27% e de 17,64% a 20,86%, respectivamente. Os painéis desenvolvidos em T1, sem substituição de partículas de embalagem de cimento, conforme Tabela 7, apresentaram resultados melhores para AA/24h com 13,99% em comparação às madeiras de pericá e embaúba no estudo de Iwakiri *et al.* (2012).

Em relação aos dados de inchamento em espessura, após 24 horas, Iwakiri *et al.* (2015) obtiveram dados satisfatórios em seu estudo com painéis de cimento: madeira, envolvendo partículas de *Eucalyptus benthamii*, com valores na faixa de 0,71 a 0,92% para os cinco tratamentos realizados. As partículas de *Eucalyptus grandis*, utilizadas na produção dos painéis em T1, apresentaram resultados com melhores propriedades em IE/24H com 0,54%, superior aos painéis desenvolvidos com *Eucalyptus benthamii* em Iwakiri *et al.* (2015).

Ao comparar as propriedades físicas de T2 e T1, observou-se um efeito prejudicial, ao substituir 25% de embalagem de cimento diante de um aumento de AA/24H e IE/24H, em 30,73% e 154,62%, respectivamente. Esse aumento, em termos percentuais de AA/24H e IE/24H, em relação a T1, foi mais expressivo para o tratamento T5 com 164,47% e 646,29%, respectivamente.

Como pressuposto da análise de regressão, erros experimentais das variáveis que envolvem as propriedades físicas Absorção de água (2/24 horas) e Inchamento em espessura (2/24 horas) foram calculados, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Pressuposto da ANOVA - normalidade e homogeneidade de AA2H/24H e IE2H/24H

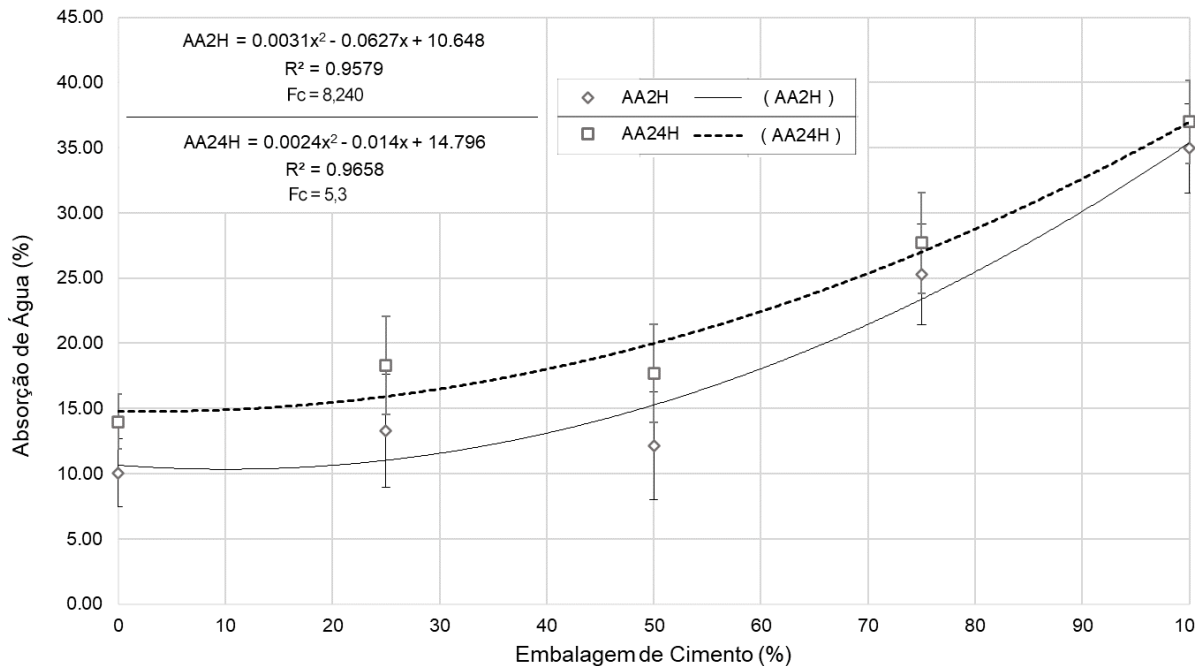
Variáveis físicas	Normalidade (Shapiro Wilk)	Homoscedasticidade (Bartlett)
Absorção de água (AA2H%)	0,0085542 NS	2,775e-08 NS
Absorção de água (AA24H%)	0,0155316 NS	4,482e-08 NS
Inchamento em espessura (IE2H%)	0,0003298 NS	5,383e-05 NS
Inchamento em espessura (IE24H%)	0,0094090 NS	5,203e-05 NS

Fonte: Do autor (2022).

Nota: NS = Não significativo em $\alpha = 0,05$.

Verificou-se uma distribuição não normal e uma não homogeneidade dos dados envolvidos, para ambos os ensaios, com o auxílio do teste de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. As regressões foram representadas e ajustadas a uma função com um coeficiente de determinação R^2 , conforme as Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x Absorção de Água - 2H/24H (%)



Legenda: * – Significativo a 5%.

C.V. (Coeficiente de Variação): (Absorção de água 2h/24h) - (T1) = 26,00% / 14,82%; (T2) = 32,68% / 20,63%; (T3) = 34,19% / 21,21%; (T4) = 15,249% / 13,92%; (T5) = 9,72% / 8,62%.

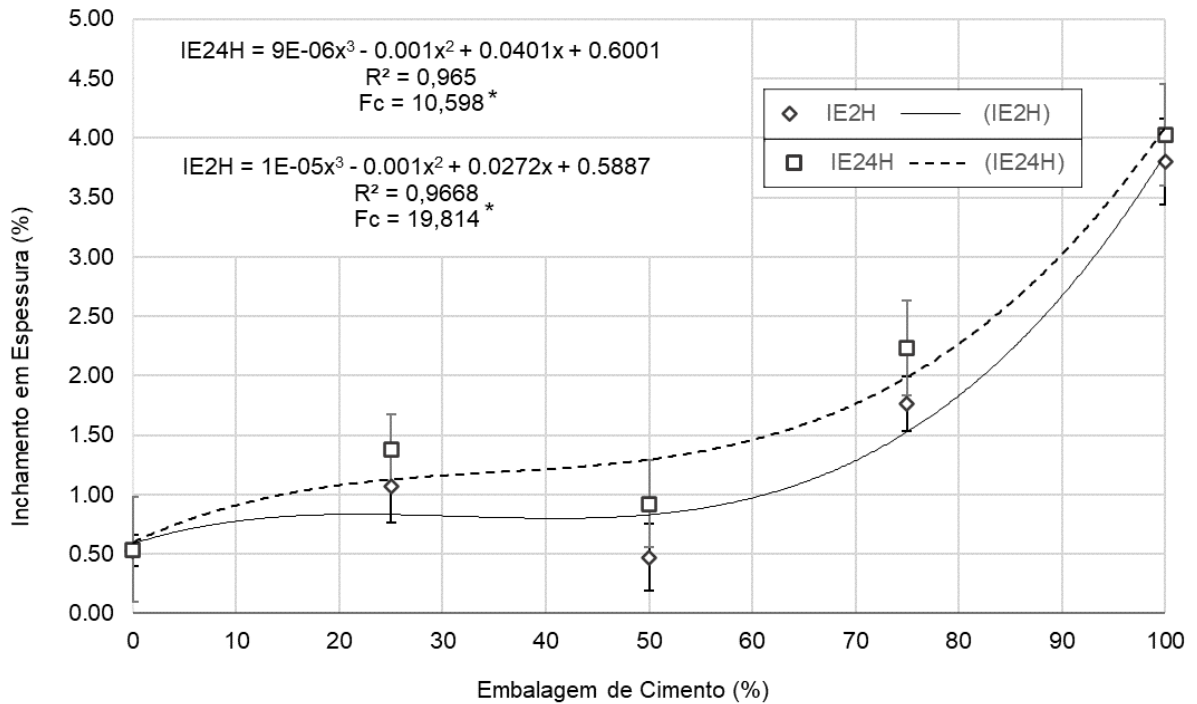
Fonte: Do autor (2022).

Foi possível observar que, pelo aumento na substituição da taxa de embalagem de cimento, houve um efeito significativo na capacidade de absorção de água dos painéis, conforme as funções de regressões expressas na Figura 10.

Ao avaliar a dispersão dos dados, o tratamento T3, com uma substituição de 50% de embalagem de cimento, apresentou uma homogeneidade inferior, em relação aos outros tratamentos, na análise de AA2H/24H, conforme coeficiente de variação de 34,19% e 21,21, respectivamente.

De acordo com o processo Bison (1978), painéis cimento: madeira devem apresentar valores de IE2H menores que 1,2% e valores de IE24H menores que 1,8%. As regressões obtidas, para o ensaio de inchamento em espessura, após 2 e 24 horas em imersão na água, conforme Figura 11, demonstraram que, diante da faixa de um percentual admitido de 1,2 a 1,8%, segundo o processo Bison (1978), as respectivas substituições limites de embalagem de cimento foram de 74,5% a 75,48% para IE2H e IE24H, respectivamente.

Figura 11 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x Inchaço em espessura - 2H/24H (%)



Legenda: * – Significativo a 5%.

C.V. (Coeficiente de Variação): (Inchaço em espessura 2h/24h) - (T1) = 27,54% / 16,33%; (T2) = 32,66% / 21,96%; (T3) = 66,68% / 39,86%; (T4) = 13,12% / 17,790%; (T5) = 9,08% / 10,53%.

Fonte: Do autor (2022).

Caso seja adotado o percentual limite de substituição de embalagem de cimento definido neste estudo em 74,5%, para atender aos critérios limites de inchaço em espessura pelo processo Bison (1978), assume-se, por consequência, uma faixa de absorção de água, após 2 e 24 horas de 23,18,5 a 27,07%, conforme Figura 10. Esses valores são superiores ao obtido no estudo de Iwakiri *et al.* (2012 *apud* IWAKIRI *et al.*, 2015), com painéis de pericá, devendo ser analisada com critério a substituição de embalagem de cimento nos painéis, conforme o uso e ambiente de utilização do painel, para atender ambos os ensaios.

Ao avaliar a dispersão dos dados, o tratamento T3, com uma substituição de 50% de embalagem de cimento, apresentou uma homogeneidade inferior, em relação aos outros tratamentos na análise de IE2H/24H, conforme coeficiente de variação de 66,68% e 39,86%, respectivamente. Essas informações revelam uma dispersão maior dos dados nesse intervalo e o cuidado exigido em recorrer a uma substituição acima de 50% diante de uma margem de segurança menor na curva da função após esse trecho.

4.4 Resultado das propriedades mecânicas dos painéis

Nos próximos tópicos serão apresentados os resultados mecânicos dos ensaios de compressão paralela e tração perpendicular, além do módulo de ruptura e de elasticidade.

4.4.1 Compressão paralela e tração perpendicular

Observou-se, para o tratamento T1 sem substituição de embalagem de cimento, um valor médio de CP igual a 37,933 kgf/cm², conforme Tabela 9. Esse valor foi inferior ao encontrado por Lopes *et al.* (2005), 159,36 kgf/cm², para o mesmo ensaio de CP, envolvendo apenas fibras de *Eucalyptus grandis*. Latorraca (2000 *apud* SA *et al.*, 2012), após ensaio de compressão paralela à superfície (CP) para painéis cimento: madeira, obteve valor médio de 36,0 a 69,6 kgf/cm² para diferentes espécies de Eucalipto.

Observou-se um efeito prejudicial às propriedades mecânicas de compressão paralela à superfície (CP), com a substituição gradual de partículas de embalagem de cimento, conforme Tabela 9. O baixo resultado de CP, para os tratamentos com aumento na substituição de embalagem de cimento, pode ser explicado pela propriedade física densidade, associada a uma alta distribuição de vazios entre as partículas do painel. O aumento de vazios (e/ou poros) internos influencia na resistência mecânica do material, os quais atuam como concentradores de tensão.

Tabela 9 - Média da Compressão Paralela à Superfície (CP) e Tração Perpendicular (TP) para efeito de análise das propriedades mecânicas dos painéis

Tratamentos	Compressão Paralela (CP)		Tração Perpendicular (TP)	
	kgf/cm ²	MPa	kgf/cm ²	MPa
T1 – 100% madeira	37,933	3,720	6,067	0,595
T2 – 75% madeira + 25% embalagem de cimento	32,122	3,150	3,670	0,360
T3 – 50% madeira + 50% embalagem de cimento	18,569	1,821	2,834	0,278
T4 – 25% madeira + 75% embalagem de cimento	15,652	1,535	1,519	0,149
T5 – 100% embalagem de cimento	8,086	0,793	0,479	0,047

Fonte: Do autor (2022).

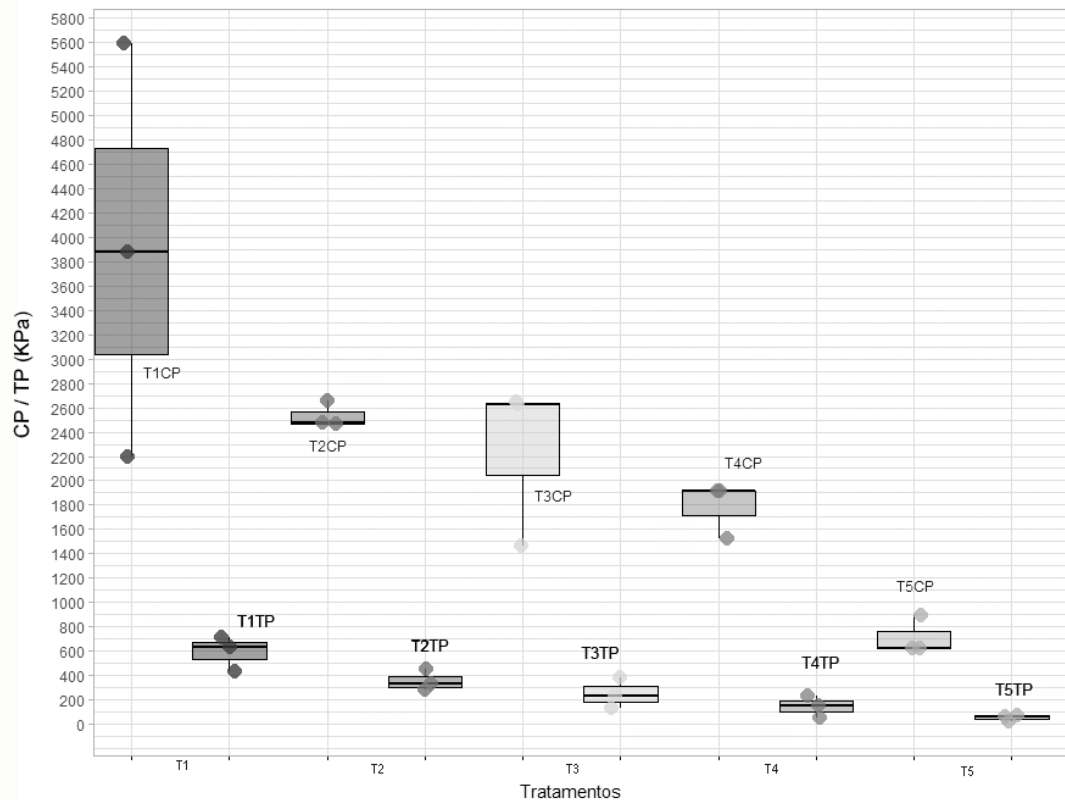
Nota: C.V. (coeficiente de variação) - Compressão Paralela (CP): (T1) = 31,26%; (T2) = 18,91%; (T3) = 31,90%; (T4) = 38,01%; (T5) = 25,70%.

C.V. (coeficiente de variação) – Tração Perpendicular (TP): (T1) = 23,88%; (T2) = 23,99%; (T3) = 50,96%; (T4) = 61,03%; (T5) = 51,79%.

O baixo desempenho mecânico no ensaio de compressão paralela também pode ser atribuído a condições de armazenagem das embalagens de cimento pelas exposições a sol e chuva. Nessa situação, segundo Cravo *et al.* (2015), o teor de celulose e lignina nas fibras é degradado por ação hidrolítica e pela radiação ultravioleta do sol.

Para efeito de entendimento da distribuição dos dados, em cada tratamento e da variação desses dados, em relação à média, observou-se, para o ensaio CP e TP, conforme Figura 12, um coeficiente de variação maior em relação ao tratamento T4, com 75% de substituição de embalagem de cimento. Os tratamentos, envolvendo uma substituição acima de 50%, demonstraram resultados com uma dispersão maior dos dados em relação à média.

Figura 12 - Dados de mediana e distribuição da Compressão Paralela (CP) e Tração Perpendicular (TP) para os 05 tratamentos



Fonte: Do autor (2022).

De acordo com os resultados observados na Tabela 9, para tração perpendicular, verificou-se, para o tratamento T1 sem substituição de partículas de embalagens de cimento, um valor médio de 0,711 MPa. Esse resultado está acima do mínimo requerido pelo processo Bison (BISON, 1978) que é igual a 4,0 kgf/cm² (0,39 MPa). Para esse mesmo tratamento de painel e ensaio, Iwakiri e Prata (2008) observaram, em seu estudo, uma tensão média de

0,47 MPa, tendo sido inclusive superior a outros painéis de seu estudo que incluiu tratamento de partículas com água quente e fria.

Entre os cinco tratamentos realizados, apenas o tratamento T1, conforme Tabela 9, está de acordo com o mínimo requerido ao ensaio de tração perpendicular, segundo processo Bison (BISON, 1978), que é de 4,0 kgf/cm² (0,39 MPa). Para o tratamento T2, que envolve a substituição de 25% de embalagens de cimento, a tração perpendicular ficou próxima do limite aceitável pelo processo Bison com um valor de 0,360 MPa.

Como pressuposto da análise de regressão, erros experimentais das variáveis que envolvem as propriedades mecânicas Compressão paralela à superfície (CP) e Tração perpendicular (TP) foram calculados, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Pressuposto da ANOVA - normalidade e homogeneidade de CP e TP

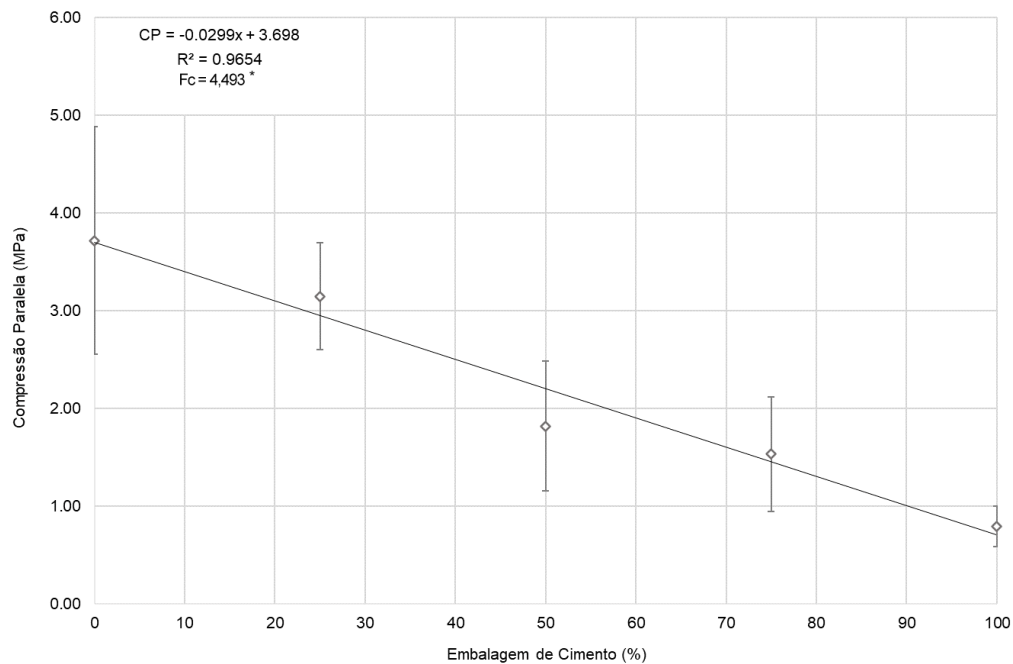
Variáveis físicas Normalidade (Shapiro Wilk) / Homoscedasticidade (Bartlett)		
Compressão paralela à superfície (CP)	0,0018502 NS	3,376e-05 NS
Tração Perpendicular (TP)	0,2281009	0,4619

Fonte: Do autor (2022).

Nota: NS = Não significativo em $\alpha = 0,05$.

Verificou-se uma distribuição não normal e uma não homogeneidade dos dados envolvidos ao ensaio de Compressão paralela à superfície (CP) com o auxílio do teste de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Já em relação ao ensaio de Tração Perpendicular (TP), verificou-se uma distribuição normal e uma homogeneidade dos dados pelos mesmos testes de análise. As regressões foram representadas e ajustadas a uma função com um coeficiente de determinação R², conforme as Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Regressão linear simples - Embalagem de Cimento (%) x CP (MPa)



Legenda: * – Significativo a 5%.

C.V. (coeficiente de variação) - Compressão Paralela (CP): (T1) = 31,26%; (T2) = 18,91%; (T3) = 31,90%; (T4) = 38,01%; (T5) = 25,70%.

Fonte: Do autor (2022).

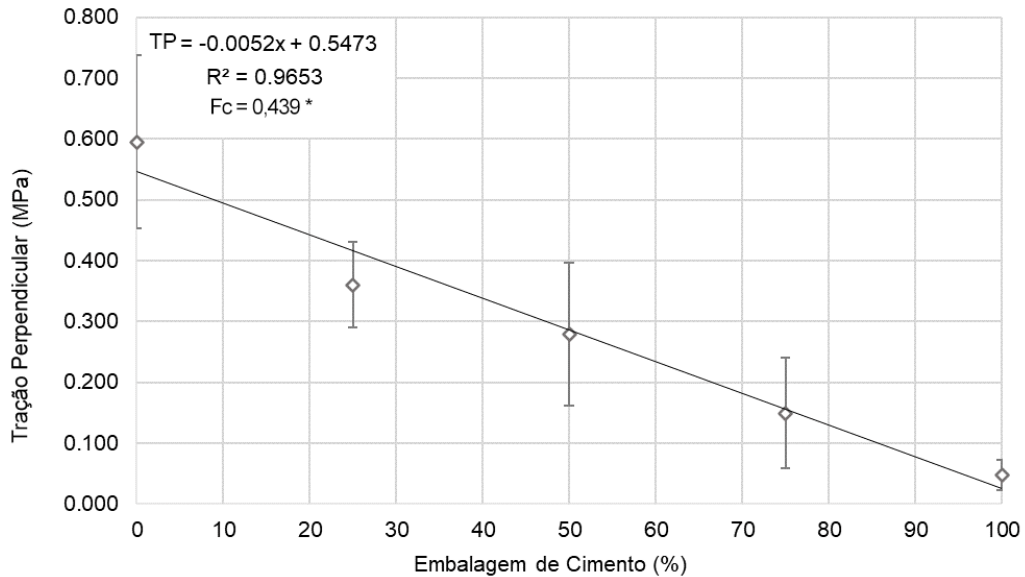
De acordo com a Figura 13, observou-se um efeito significativo da substituição de embalagem de cimento pela madeira em relação à propriedade de compressão paralela. A substituição de 25% de embalagem de cimento pela madeira proporcionou uma redução de 15,3% na compressão paralela. Ao analisar o aumento na substituição da embalagem de cimento de 25% para 50%, verificou-se uma queda na resistência de 42,19% para o mesmo ensaio.

Para efeito de entendimento do grau de homogeneidade do painel fabricado pelo coeficiente de variação dos dados, envolvendo o ensaio de Compressão Paralela (CP), verificou-se uma variação maior de 38,01% em relação à média, para o tratamento T4, com 75% de substituição em embalagem de cimento, seguido pelo tratamento T3. Essas informações revelam uma dispersão maior dos dados nesse intervalo que compreende de 50% a 75% de substituição de embalagem de cimento, tendo uma margem de segurança menor na reta da função gerada.

Verificou-se um efeito significativo da porcentagem de embalagem de cimento, em relação à madeira para o ensaio de tração perpendicular, conforme Figura 14. A substituição da embalagem de cimento foi prejudicial à propriedade da tração perpendicular, sendo permitida uma porcentagem limite desse resíduo igual a 30,25%, caso busque atender aos critérios

mínimos definidos pelo processo Bison (1978) de 0,39 MPa para TP. Nesta condição, apenas os tratamentos T1 e T2 atenderam às normas de comercialização quanto à propriedade de tração perpendicular.

Figura 14 - Regressão linear simples - Embalagem de Cimento (%) x TP (MPa)



Legenda: * – Significativo a 5%.

C.V. (coeficiente de variação) – Tração perpendicular (TP): (T1) = 23,88%; (T2) = 23,99%; (T3) = 50,96%; (T4) = 61,03%; (T5) = 51,79%.

Fonte: Do autor (2022).

Caso seja adotado o percentual limite de substituição da embalagem de cimento definido em 30,25% pelo ensaio de tração perpendicular, assume-se, por consequência, que a resistência atingida nos painéis, para o ensaio de compressão paralela, seja igual a 2,79 MPa.

4.4.2 Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) constam na Tabela 11. Observaram-se valores para MOE e MOR com tendências de comportamento distintos para os tratamentos realizados. Verificou-se de forma qualitativa uma queda em relação às propriedades mecânicas MOE com o aumento na substituição de embalagem de cimento na sequência dos tratamentos T1:T5.

Tabela 11 - Média do módulo de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR) para efeito de análise das propriedades mecânicas dos painéis

Tratamentos	Flexão Estática			
	MOE		MOR	
	kgf/cm ²	GPa	kgf/cm ²	MPa
T1 – 100% madeira	14.094,569	1,3822	62.3964	6,119
T2 – 75% madeira + 25 embalagens de cimento	11.262,8074	1,1045	75.4284	7,397
T3 – 50% madeira + 50 embalagens de cimento	10.250,327	1,0521	66.7404	6,545
T4 - 25% madeira + 75 embalagens de cimento	4.414,367	0,4329	32.3658	3,174
T5 – 100% embalagem de cimento	3.523,132	0,1725	16.1013	1,579

Fonte: Do autor (2022).

Nota: C.V. (coeficiente de variação) – Módulo de Ruptura (MOR): (T1) = 20,31%; (T2) = 20,41%; (T3) = 30,88%; (T4) = 22,18%; (T5) = 36,23%.

C.V. (coeficiente de variação) – Módulo de Elasticidade (MOE): (T1) = 22,36%; (T2) = 27,28%; (T3) = 41,51%; (T4) = 27,57%; (T5) = 56,23%.

Entre os cinco tratamentos realizados, T1 apresentou a maior média ao resultado de MOE, igual a 1,3822 Gpa. Ao analisar os resultados de MOE, todos os tratamentos não atenderam o valor mínimo exigido, no processo industrial Bison (1978), definido em 3000 MPa. Em relação ao MOR, T2 apresentou a maior média de 7,397 MPa entre os cinco tratamentos, embora, ainda assim, esteja abaixo da resistência mínima prevista de 9,0 Mpa, segundo o processo BISON.

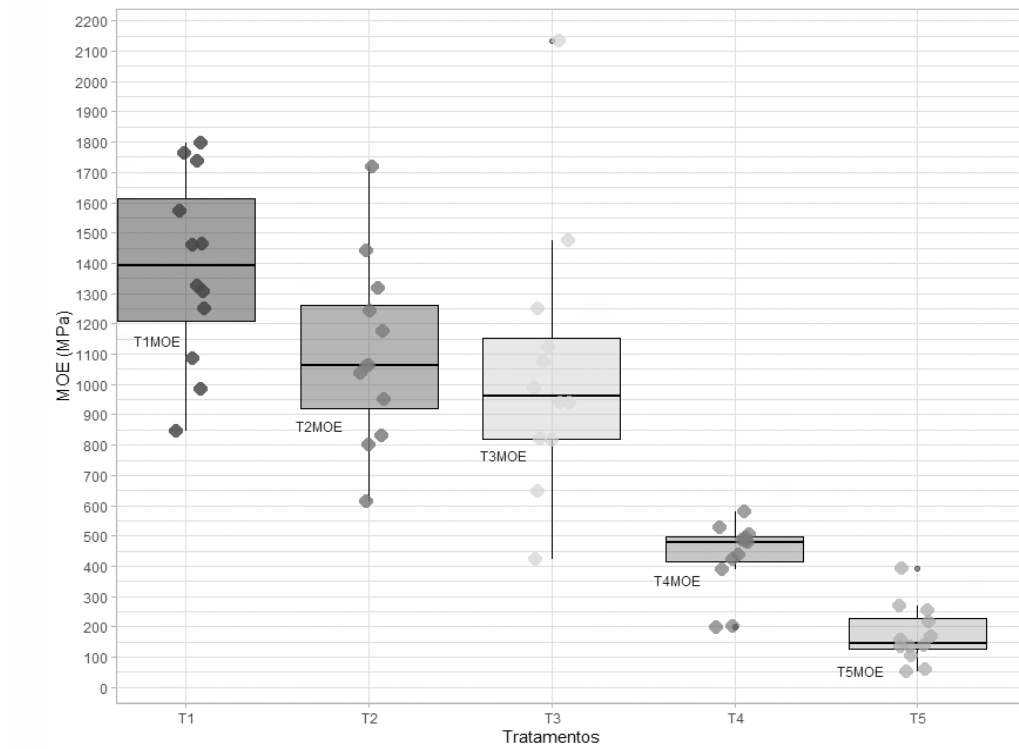
A incorporação de embalagens de cimento resultou em melhorias nas propriedades mecânicas do módulo de ruptura (MOR) a uma taxa máxima de 23,17%. O tratamento T2, com uma incorporação de 25% de embalagens de cimento, apresentou a maior média entre os cinco tratamentos (7,397 MPa), embora esteja abaixo dos critérios mínimos exigidos para MOR pelo método Bison (1978) de 9,0 MPa.

O tratamento T2 apresentou uma redução na resistência de MOE de 20,09%, em relação a T1, embora tenha sido observado um ganho de resistência em MOR de 20,88%. Nesse sentido, os painéis do tratamento T2 rompem sob uma solicitação de carga superior a T1 e sofrem uma deformação maior durante esse processo.

Na Figura 15, foi representado um gráfico boxplot com dados estatísticos envolvendo a mediana e a distribuição dos dados do Módulo de Elasticidade (MOE) com seus outliers, para os cinco tratamentos realizados, sendo possível inclusive identificar uma distribuição maior dos dados para T1 e outliers expressivos para T3. Para efeito de entendimento da homogeneidade

dos dados, foram informados, abaixo da Tabela 11, os coeficientes de variação que indicam a variação dos dados em relação à média.

Figura 15 - Dados de mediana e distribuição do Módulo de Elasticidade (MOE) para os 05 tratamentos



Fonte: Do autor (2022).

De acordo com os resultados observados na Tabela 11, para Módulo de Elasticidade (MOE), verificou-se, para o tratamento T1 sem substituição de partículas de embalagens de cimento, um valor médio de 1,3822 GPa. Esse resultado está abaixo do mínimo requerido pelo processo Bison (BISON, 1978) que é igual a 3,0 GPa. Para esse mesmo tratamento e ensaio de painel com partículas de *Eucalypto Grandis*, Lilge, Haselein e Santini (2021) obtiveram, em seu estudo, uma tensão resultante média de 2,42 GPa, embora, ainda assim, estivesse abaixo do mínimo previsto pelo processo Bison (1978).

Como pressuposto da análise de regressão, os erros experimentais das variáveis que envolvem as propriedades mecânicas Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) foram calculados, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Pressuposto da ANOVA - normalidade e homogeneidade dos dados de MOE e MOR

Variáveis físicas Normalidade (Shapiro Wilk) / Homoscedasticidade (Bartlett)		
Módulo de Ruptura (MOR)	0.0902005	6,051e-06 NS
Módulo de Elasticidade (MOE)	0.0282212 NS	9,096e-06 NS

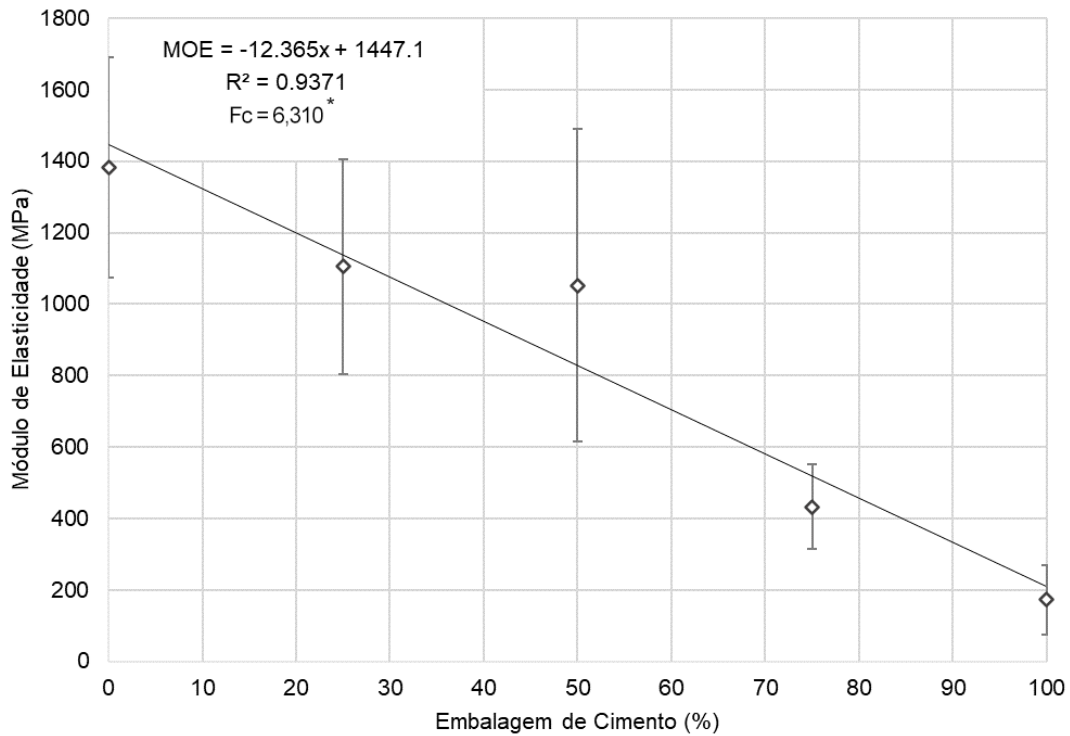
Fonte: Do autor (2022).

Nota: NS = Não significativo em $\alpha = 0,05$.

Observou-se uma distribuição normal e uma não homogeneidade dos dados envolvidos, para o ensaio de Módulo de Ruptura (MOR), com o auxílio do teste de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Já em relação ao ensaio de Módulo de Elasticidade (MOE), verificou-se uma distribuição não normal e uma não homogeneidade dos dados pelos mesmos testes de análise. As regressões foram representadas e ajustadas a uma função com um coeficiente de determinação R^2 , conforme as Figuras 16 e 18.

Verificou-se um efeito significativo da porcentagem de embalagem de cimento, em relação à madeira, para o ensaio de Módulo de Elasticidade (MOE), conforme Figura 16. A substituição da embalagem de cimento foi prejudicial a esse ensaio, sendo recomendado os painéis fabricados em T1 para se aproximar aos valores mínimos exigidos pelo processo industrial Bison (1978). Em T1, a média obtida para MOE representa menos da metade (46%) da resistência mínima prevista de 3,0 GPa, segundo o processo Bison (1978).

Figura 16 - Regressão linear simples - Embalagem de Cimento (%) x MOE (MPa)



Legenda: * – Significativo a 5%.

C.V. (coeficiente de variação) – Módulo de Elasticidade (MOE): (T1) = 22,36%; (T2) = 27,28%; (T3) = 41,51%; (T4) = 27,57%; (T5) = 56,23%.

Fonte: Do autor (2022).

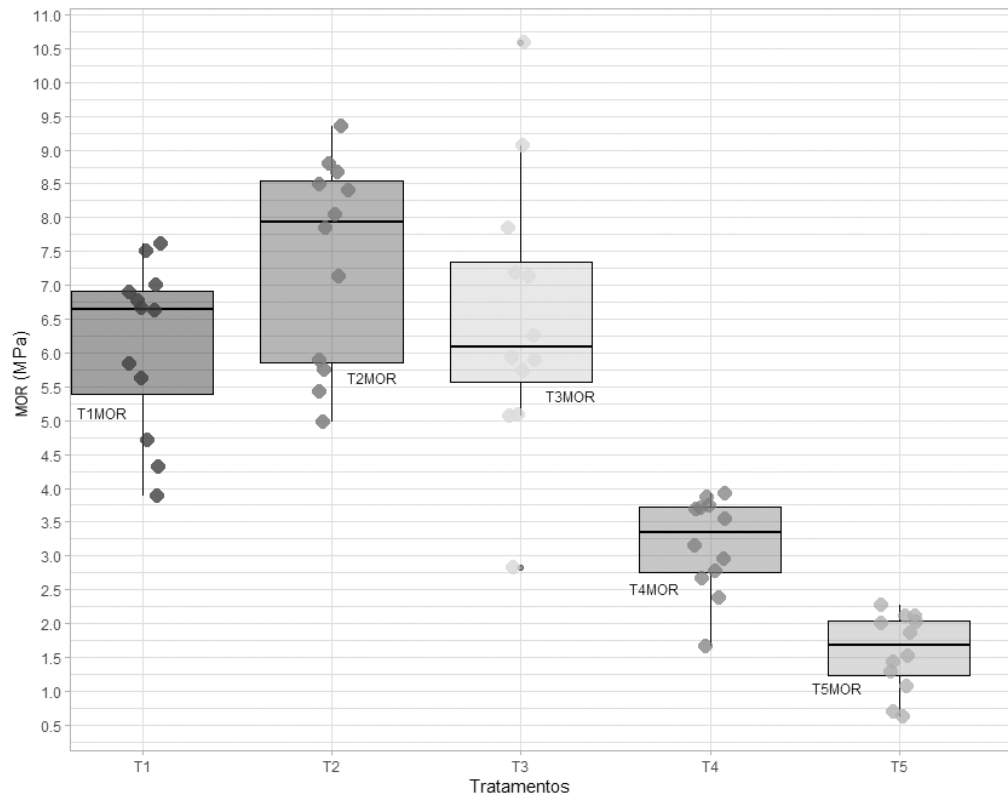
Ao avaliar a dispersão dos dados, o tratamento T5 com uma substituição de 100% de embalagem de cimento, seguido pelo tratamento T3, apresentaram homogeneidades inferiores, em relação aos outros tratamentos na análise de Módulo de Elasticidade, conforme os coeficientes de variação iguais a 56,23% e 41,51%, respectivamente. Essas informações revelam uma dispersão maior dos dados nesses intervalos e o cuidado exigido em recorrer a uma substituição acima de 50% diante de uma margem de segurança menor na reta da função entre esses trechos.

A análise de módulo de ruptura (MOR), para os cinco tratamentos, seguiu um comportamento distinto, conforme Figura 17. Foi possível observar um melhor comportamento mecânico do módulo de ruptura, envolvendo uma substituição de 23,17% de embalagem de cimento, conforme função da regressão representada na Figura 18. O tratamento T2, com uma substituição de 25% de embalagem de cimento, foi superior aos demais tratamentos com uma média de MOR igual a 7,397 MPa, seguido pelos tratamentos T3 e T1.

Para o tratamento T1, envolvendo apenas painéis com partículas de *Eucalyptus grandis*, foi obtido um MOR igual a 6,119 MPa. Iwakiri *et al.* (2015), em seus estudos com painéis cimento: madeira envolvendo 100% de fibras de *Eucalyptus grandis* e *dunnii* sem pré-

tratamento, obtiveram valores de MOR na ordem de 6,47 a 9,9 MPa e de 3,53 a 4,02 MPa, respectivamente.

Figura 17 - Dados de mediana e distribuição do Módulo de Ruptura (MOR) para os cinco tratamentos



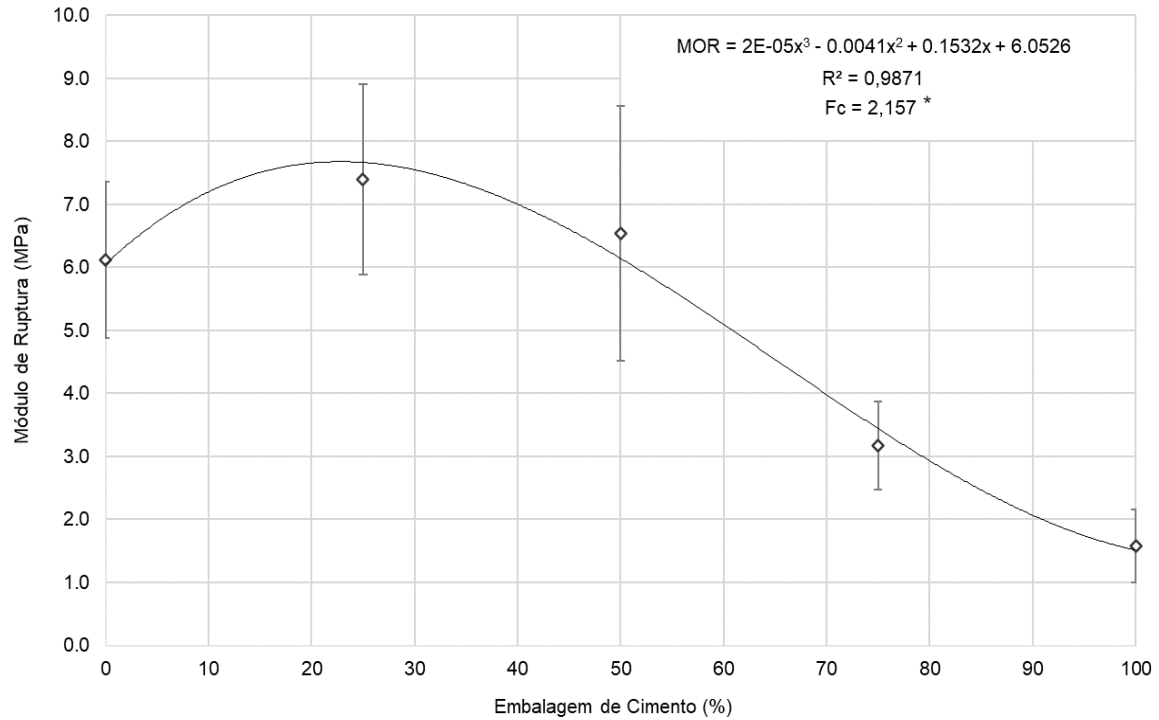
Fonte: Do autor (2022).

De acordo com os resultados observados na Tabela 11, para Módulo de Ruptura (MOR), verificou-se, para o tratamento T2 com 25% de substituição de partículas de embalagens de cimento, um valor médio de 7,397 MPa. Esse resultado está abaixo do mínimo requerido pelo processo Bison (BISON, 1978) que é igual a 9,0 MPa para o ensaio MOR. Para esse mesmo ensaio e com um tratamento envolvendo apenas partículas de *Eucalypto Grandis*, Lilge, Haselein e Santini (2021) obtiveram, em seu estudo, uma tensão resultante média de 11.918 MPa, acima do mínimo previsto pelo processo Bison (1978).

Verificou-se um efeito significativo da porcentagem de embalagem de cimento, em relação à madeira para o ensaio de Módulo de Ruptura (MOR), conforme Figura 18. A substituição da embalagem de cimento acima de 23,17% foi prejudicial a esse ensaio, sendo recomendados os painéis fabricados em T1 e T2, por se aproximarem aos valores mínimos de 9,0 MPa exigidos pelo processo industrial Bison (1978).

A regressão para o Módulo de Ruptura (MOR) foi representada e ajustada a uma função com um coeficiente de determinação R^2 , conforme Figura 18.

Figura 18 - Regressão simples - Embalagem de Cimento (%) x MOR (MPa)



Legenda: * – Significativo a 5%.

C.V. (coeficiente de variação) – Módulo de Ruptura (MOR): (T1) = 20,31%; (T2) = 20,41%; (T3) = 30,88%; (T4) = 22,18%; (T5) = 36,23%.

Fonte: Do autor (2022).

O aumento na substituição de partículas de embalagem de cimento influenciou na redução imediata da resistência de MOE, enquanto para MOR houve um efeito benéfico na resistência com uma substituição máxima de embalagens de cimento de 23,17%.

5 CONCLUSÕES

A substituição de embalagem de cimento prejudica as propriedades físicas (AA e IE) e mecânicas (CP, TP e MOE) dos painéis cimento: madeira. Apenas a propriedade mecânica Módulo de Ruptura (MOR) apresentou um efeito benéfico na resistência com a gradual substituição de embalagens de cimento até um limite de 23,17%.

Permite-se uma substituição elevada (74,5%) de embalagem de cimento para atender aos critérios de inchamento em espessura (IE) segundo o processo Bison (1978). No entanto assumem-se, por consequência, interferências nos limites de outras propriedades físicas e mecânicas.

Recomenda-se uma máxima substituição da embalagem de cimento em 30,25%, para atender ao limite previsto pelo ensaio de tração perpendicular (TP), conforme os critérios do processo Bison (1978). Deve-se avaliar a interferência, em relação às outras propriedades físicas e mecânicas, para efeito de ajuste da substituição do resíduo, conforme uso e ambiente do painel cimento: madeira.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1037**: standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. West Conshohocken: ASTM, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama 2021**. São Paulo: Abrelpe, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14660**: madeira: amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. de. Compósito Eucalyptus grandis: cimento Portland Portland cement: Eucalyptus grandis composite. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 65, p. 150-161, 2004.

BERGER, F.; GAUVIN, F.; BROUWERS, H. J. H. The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 260, p. 119786, Nov. 2020.

BHAGAT, D.; BHALLA, S.; WEST, R. P. Fabrication and structural evaluation of fibre reinforced bamboo composite beams as green structural elements. **Composites Part C**: open access, Kidlington, v. 5, p. 100150, Apr. 2021.

BIANCHE, J. J. *et al.* Propriedades de painéis aglomerados fabricados com partículas de eucalipto. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 623-630, 2012.

BISON. Wood-cement board. **Bison-Reports**, Berlin, p. 10, 1978.

BORGES, M. G.; LEITE, M. E.; LEITE, M. R. Mapeamento do Eucalipto no estado de Minas Gerais utilizando o Sensor Modis. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 53-70, 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.305%2C%20DE%202%20DE%20AGOSTO%20DE%202010.&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,1998%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias. Acesso em: 10 set. 2022.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 nov. 2002. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=263>. Acesso em: 10 jun. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. Brasília, DF, 2002. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=108894#:~:text=Fica%20estabelecido%20o%20prazo%20m%C3%A1ximo,volumes%2C%20e%20o%20prazo%20m%C3%A1ximo](http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=108894#:~:text=Fica%20estabelecido%20o%20prazo%20m%C3%A1ximo,volumes%2C%20e%20o%20prazo%20m%C3%A1ximo.). Acesso em: 10 set. 2022.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 10th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**: uma abordagem integrada. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

CASTRO, V. G. de *et al.* Painéis cimento-madeira de Eucalyptus saligna com diferentes aditivos químicos e métodos de formação. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 349-360, 2015.

CASTRO, V. G. de *et al.* Wood-cement boards manufactured by vibro-dynamic compression. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 9, n. 3, p. 134-142, 2018.

CORREA, F. A. P.; SGUAREZI, S. B.; MELO, S. A. B. X. de. Atuação do Ministério Público na reciclagem de resíduos sólidos urbanos: uma revisão da literatura. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 1-17, 2022.

CRAVO, J. C. M. *et al.* Manufacture of particleboard based on cement bag and castor oil polyurethane resin. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 87, p. 8-15, July 2015.

FRYBORT, S. *et al.* Cement bonded composites: a mechanical review. **BioResources**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDISATION. **DIN 52362**: testing of wood chipboards; bending test, determination of bending strength. Berlin: DIN, 1965.

GONÇALVES, S. C. *et al.* A gestão dos resíduos da construção civil sob os aspectos legais e normativos. **Revista NUPEM**, Campo Mourão, v. 4, n. 7, p. 133-151, 2017.

HWANG, Y. *et al.* Evaluation of cellulose paper degradation irradiated by an electron beam for conservation treatment. **Cellulose**, Bucharest, v. 28, n. 2, p. 1071-1083, 2021.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de painel compensado estrutural de Eucalyptus grandis E Eucalyptus dunnii. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, p. 363-367, 2007.

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, 2015.

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, 2008.

KARIMAH, A. *et al.* A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. **Journal of Materials Research and Technology**, New York, v. 13, p. 2442-2458, 2021.

KHAN, M. I.; ABBAS, Y. M.; FARES, G. Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating various combinations of fibers and ultrafines. **Journal of King Saud University: engineering sciences**, Algeria, v. 29, n. 4, p. 339-347, 2017.

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, 2021.

LOPES, Y. L. V. *et al.* Avaliação do potencial técnico da madeira e cascas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 67, p. 111-122, 2005.

MAFFEZZOLI, A. *et al.* Cardanol based matrix biocomposites reinforced with natural fibres. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 64, n. 6, p. 839-845, May 2004.

MAHMUD, M. A.; ANANNYA, F. R. Sugarcane bagasse: a source of cellulosic fiber for diverse applications. **Heliyon**, New York, v. 7, n. 8, p. e07771, 2021.

MÁRMOL, G. *et al.* Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags. **Industrial Crops and Products**, London, v. 49, p. 422-427, 2013.

MARQUES, C.; CÓRDOBA, R. E. Gestão de resíduos da construção civil: soluções para municípios de pequeno porte. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO CIDADES + RESILIENTES, 1., 2020, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: UFSCar, 2020. p. 623-633.

MARQUES, M. L. *et al.* Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 5, p. 466-472, maio 2016.

MATOSKI, A. *et al.* Influence of accelerating admixtures in wood-cement panels: characteristics and properties. **Acta Scientiarum: technology**, Maringá, v. 35, n. 4, p. 655-660, out. 2013.

MEDEIROS, M. O. *et al.* Diagnóstico do acondicionamento e transporte de RCCs gerados pelas empresas construtoras da grande João Pessoa. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 1, n. 27, p. 96, 2015.

MEJIA-BALLESTEROS, J. E. *et al.* Influence of the fiber treatment and matrix modification on the durability of eucalyptus fiber reinforced composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 124, p. 104280, Nov. 2021.

MEKO, B.; IGHALO, J. O. Utilization of *Cordia Africana* wood sawdust ash as partial cement replacement in C 25 concrete. **Cleaner Materials**, Knoxville, v. 1, p. 100012, Aug. 2021.

- MENDES, L. M. *et al.* Potencial de utilização da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* na produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 69-75, 2011.
- MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. **Cement and Concrete Composites**, Elmsford, v. 27, n. 4, p. 435-448, 2005.
- NARAGANTI, S. R.; PANNEM, R. M. R.; PUTTA, J. Impact resistance of hybrid fibre reinforced concrete containing sisal fibres. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, v. 10, n. 2, p. 297-305, 2019.
- NATIONAL STANDARDS BODY OF INDIA. **IS 14276**: cement bonded particle boards- Specification. New Delhi: NSBI, 1995.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- OKINO, E. Y. A. *et al.* Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, Elmsford, v. 26, n. 6, p. 729-734, 2004.
- OLIVEIRA, F. A. C. *et al.* Portland cement clinker production using concentrated solar energy: a proof-of-concept approach. **Solar Energy**, Kidlington, v. 183, p. 677-688, May 2019.
- OSMANOVIC, Z.; HARAČIĆ, N.; ZELIĆ, J. Properties of blastfurnace cements (CEM III/A, B, C) based on Portland cement clinker, blastfurnace slag and cement kiln dusts. **Cement and Concrete Composites**, Elmsford, v. 91, p. 189-197, Aug. 2018.
- PALOU, M. T. *et al.* The effect of curing temperature on the hydration of binary Portland cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Oxford, v. 125, n. 3, p. 1301-1310, Sept. 2016.
- PENA-VERGARA, G. *et al.* Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. **Energy**, Oxford, v. 239, p. 122243, 2022.
- PENNA, P. C. **Vendas de cimento crescem 6,6% em 2021**. Disponível em: <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-66-em-2021/>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- PUGLIESI, N. **Cimento**: diferentes tipos e aplicações. 2018. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- RICARDO, P. *et al.* Espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 14, n. 1, p. 1-9, 2015.
- ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R.; PARCHEN, C. F. A. Influência da composição granulométrica das partículas de resíduos de madeira nas propriedades de compósitos minerais: parte 1: cimento-madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 113-126, 2019.
- RODRIGUES, G. S. de S. C. *et al.* **Eucalipto no Brasil**: expansão geográfica e impactos ambientais. Uberlândia: Ed. UFU, 2021.

ROSA, T. S. da *et al.* Physical and mechanical properties of oriented wood-cement boards produced with five Eucalyptus species. **Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 3, p. 317-322, 2017.

SA, V. A. de *et al.* Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 3, p. 549-557, 2012.

SAHOO, G. *et al.* A process of analyzing the performance evaluation of sisal fiber in fiber reinforced composites. **Materials Today: proceedings**, New York, v. 56, n. 6, p. 3201-3206, Oct. 2021.

SALES, D. de C. **Desenvolvimento de painéis aglomerados de papel kraft proveniente de embalagens descartadas de cimento**. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SALES, D. de C.; CABRAL, A. E.; MEDEIROS JUNIOR, M. S. Development of fiberboard panels manufactured from reclaimed cement bags. **Journal of Building Engineering**, New York, v. 34, p. 101525, Feb. 2021.

SALGADO, I. de P.; SILVA, F. de A. Flexural behavior of sandwich panels combining curauá fiber-reinforced composite layers and autoclaved aerated concrete core. **Construction and Building Materials**, New York, v. 286, p. 122890, June 2021.

SANTOS, R. de J. **Análise na produção de tijolos solo-cimento incorporando sacos de cimento na sua composição**. 2020. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SANTOS, R. P.; CRISTINA, L.; RIBEIRO, N. Avaliação do uso de argamassas de revestimento produzidas considerando o clima equatorial da amazônia oriental. **Revista Científica Multidisciplinar do CEAP - RCMC**, Macapá, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2022.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. **Wood-cement composites: suitability of western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas**. Barton: RIRDC, 2004. 65 p.

SILVA, A. F. F. **Gerenciamento de resíduos da construção civil de acordo com a Resolução CONAMA Nº. 307/02: estudo de caso para um conjunto de obras de pequeno porte**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, F. R. da *et al.* **Análises ecológicas no R**. Joinville: Clube dos Autores, 2022.

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden**. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP & PAPER INDUSTRY. **T 211 om-07: ash in wood, pulp, paper and paperboard**. Peachtree Corners: TAPPI, 2007.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP & PAPER INDUSTRY. **T 222 om-06: acid-insoluble lignin in wood and pulp**. Peachtree Corners: TAPPI, 2006.

TERZIĆ, A. *et al.* The effect of alternations in mineral additives (zeolite, bentonite, fly ash) on physico-chemical behavior of Portland cement based binders. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 180, p. 199-210, Aug. 2018.

VINOD, A. *et al.* Jute/Hemp bio-epoxy hybrid bio-composites: Influence of stacking sequence on adhesion of fiber-matrix. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Guildford, v. 113, p. 103050, Nov. 2021.