

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THYAGO DE SILOS DAMAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO COMPÓSITO
CIMENTO-MADEIRA UTILIZANDO FARINHA DE MADEIRA *PINUS* COM
CIMENTO PORTLAND**

CURITIBA

2024

THYAGO DE SILOS DAMAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO COMPÓSITO
CIMENTO-MADEIRA UTILIZANDO FARINHA DE MADEIRA *PINUS* COM
CIMENTO PORTLAND**

**Evaluation of the physical and mechanical properties of cement-wood
composite using pine wood flour with portland cement**

Trabalho de Dissertação apresentado como requisito
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



THYAGO DE SILOS DAMAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO COMPÓSITO CIMENTO-MADEIRA
UTILIZANDO FARINHA DE MADEIRA PINUS COM CIMENTO
PORTLAND**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 12 de Julho de 2024

Dr. Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Cristiane Mansur De Moraes Souza, Doutorado - Fundação Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciências Tecnológicas. Dr. Mario Procopiuck, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 09/10/2024.

Dedico a Roberto e Rosemary de Silos Damas,
meus pais.
Dedico também a minha amada esposa Patrícia e a
minha pequena Robertha (5 meses), minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Adalberto Matoski, meu orientador, pela disponibilidade, sabedoria, auxílio e atenção ao longo de todo o desenvolvimento do mestrado.

À Coordenação do programa, representada pelo Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho, agradeço pela cooperação e orientações preciosas em todas as etapas do mestrado.

Aos membros da banca, expresso minha gratidão pelas pontuações e observações fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa. Especialmente à Profa. Dra. Cristiane Mansur, que me inseriu na jornada de pesquisador ainda na graduação e sempre me incentivou quando necessário, e ao Prof. Dr. Mario Prokopiuk, pelo incentivo e encorajamento desde minha admissão como aluno regular no programa de mestrado.

A meus amados pais, Roberto e Rosemary, agradeço pelo apoio, paciência, esforço, ensinamentos e inspiração que foram fundamentais ao longo deste trabalho. Pois, desde sempre acreditaram em mim.

À minha amada esposa, Patrícia, agradeço pelo apoio e sacrifício, pois foram muitas madrugadas e finais de semana dedicados à dissertação. E à minha pequenina Robertha, nossa primeira filha, gestada durante o mestrado e nascida nos meses que antecederam minha preparação para a defesa.

Expresso minha gratidão à família Tomazi do Grupo Tarumã, especialmente aos CEOs Sr. Jader (Andraus), Sr. Osório (Tarumã) e Sr. Andrey (Premium), a quem tenho grande estima e admiração. A generosidade deles ao permitir que eu conciliasse a responsabilidade técnica de suas obras com meu sonho acadêmico de me tornar mestre em engenharia foi fundamental para este sucesso.

Aos meus colegas de mestrado, agradeço pela troca de experiências e aprendizados compartilhados ao longo deste período.

A Deus, dedico todo esforço e jornada, desde o nascer até o porvir, por seu imenso amor e misericórdia para comigo.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Nem todas as coisas difíceis na vida podem ser
facilitadas. Mas é possível tornar mais fácil aquilo
que é mais importante
(MCKEOWN, 2022).

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas do compósito madeira-cimento de baixa densidade, utilizando farinha de madeira de *Pinus* spp. proveniente do reaproveitamento do rejeito de indústrias madeireiras e cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Para a elaboração dos ensaios, foi utilizado como traço referência 1:3 (cimento:areia) em massa, e os percentuais de farinha de madeira em massa foram de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em relação a massa de cimento, sem aditivo e com 3% de aditivo acelerador de pega à base de cloreto de cálcio. Para cada traço foram produzidos seis corpos de prova e avaliadas suas propriedades físicas (densidade, absorção de água por capilaridade e absorção por imersão) e propriedades mecânicas (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, estático e módulo de ruptura). Os resultados demonstraram que densidade, absorção de água e porosidade são propriedades físicas inter-relacionadas, e a resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, estático e módulo de ruptura são propriedades mecânicas que possuem elevada correlação em relação à densidade e aos teores de madeira. O módulo de elasticidade estático, das propriedades avaliadas, foi o único que não obteve em nenhuma amostra o valor mínimo aceitável de 4.000 MPa. Além disso, a adição de aditivo, em geral, não trouxe um melhor desempenho das propriedades avaliadas do compósito. Conclui-se, portanto, que os valores obtidos das propriedades físicas e mecânicas do compósito madeira-cimento, em sua maioria, atenderam aos valores estipulados nas normas e pesquisas citadas como critérios mínimos aceitável.

Palavras-chave: compósito; cimento-madeira; aditivos; propriedades físicas; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the physical and mechanical properties of low-density wood-cement composite, using *Pinus* spp. wood flour sourced from the waste reuse of timber industries and high early strength Portland cement (CPV-ARI). For the preparation of the tests, a reference mix ratio of 1:3 (cement:sand) by mass was used, and the mass percentages of wood flour were 0%, 5%, 10%, 15% and 20% relative to the cement mass, without additive and with 3% calcium chloride-based set accelerator additive. For each mix, six test specimens were produced and their physical properties (density, water absorption by capillarity and immersion absorption) and mechanical properties (flexural tensile strength, compressive strength, dynamic and static modulus of elasticity, and modulus of rupture) were evaluated. The results showed that density, water absorption, and porosity are interrelated physical properties, and flexural tensile strength, compressive strength, dynamic and static modulus of elasticity, and modulus of rupture are mechanical properties that have a high correlation with density and wood content. Among the evaluated properties, the static modulus of elasticity was the only one that did not obtain the minimum acceptable value of 4,000 MPa in any sample. Furthermore, the addition of the additive generally did not improve the evaluated properties of the composite. Therefore, it is concluded, that the values obtained for the physical and mechanical properties of the wood-cement composite mostly met the values stipulated in the standards and cited research as minimum acceptable criteria.

Keywords: composite; wood-cement; additives; physical properties; mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução do déficit habitacional (em milhões de unidades).....	22
Figura 2 - Classificação das figuras naturais	27
Figura 3 - Ensaio de índice de consistência	54
Figura 4 - Amassadeira e forma prismática para moldagem de corpos de prova	63
Figura 5 - Estufa e peneiras para ensaio de composição granulométrica	64
Figura 6 - Ensaio de composição granulométrica.....	65
Figura 7 - Densidade de massa aparente: corpo de prova e medição.....	66
Figura 8 - Ensaio de absorção de água por capilaridade aos 10 minutos (m_{10}) e aos 90 minutos (m_{90})	67
Figura 9 - Ensaio de absorção de água por imersão	68
Figura 10 - Ensaio de resistência à tração na flexão	70
Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão axial.....	71
Figura 12 - Ensaio para a determinação do MOE dinâmico.....	71
Figura 13 - Curva granulométrica da areia média	76
Figura 14 - Curva granulométrica do <i>Pinus</i> spp.....	77
Figura 15 - Relação dos valores médios da densidade aparente com o teor de madeira	78
Figura 16 - Relação entre densidade aparente e resistência à compressão.....	79
Figura 17 - Relação entre teor de madeira e a resistência a tração na flexão	83
Figura 18 - Relação entre densidade e a resistência a tração.....	85
Figura 19 - Relação entre teor de madeira e a resistência à compressão.....	87
Figura 20 - Relação entre densidade e a resistência à compressão	87
Figura 21 - Relação entre MOE (E_d) e a densidade.....	89
Figura 22 - Relação entre MOR e a massa específica	92

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1 – Consumo energético por material	21
Tabela 2 - Tipos básicos de Cimento Portland e suas especificações	30
Tabela 3 - Limites de composição do Cimento Portland (% em massa)	31
Tabela 4 - Pesquisas a respeito de CMCs com cimento Portland	33
Tabela 5 - Relação a/c em pesquisas a respeito de CMCs com pinus	35
Tabela 6 - Pesquisas a respeito de CMCs com pinus	38
Tabela 7 - Traços para a produção dos compósitos (cimento/areia/madeira) ...	41
Tabela 8 - Limites granulométricos do agregado miúdo	43
Tabela 9 - Valores de MOE para painéis madeira-cimento de diversas espécies de pinus com adição de 3% de CaCl_2	13
Tabela 10 - Valores de MOR para painéis madeira-cimento de diversas espécies de pinus com adição de 3% de CaCl_2	52
Tabela 11 - Especificações CP V-ARI	60
Tabela 12 - Traços da pesquisa	64
Tabela 13 - Traço pesquisa.....	69
Tabela 14 - Módulo de finura e dimensão máxima da areia média	75
Tabela 15 - Módulo de finura e dimensão máxima do <i>Pinus</i> spp.....	76
Tabela 16 - Resultados de densidade de massa aparente no estado endurecido	77
Tabela 17 - Resultados de absorção de água por capilaridade	80
Tabela 18 - Resultados de absorção de água por imersão.....	81
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão	83
Tabela 20 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão	85
Tabela 21 - Resultados dos ensaios do MOE dinâmico.....	88
Tabela 22 - Resultados do MOE estático e MOR	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAINC	Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias
CIB	Conselho Internacional da Construção
CBVC	Compósitos de biomassa vegetal-cimento
CEPED	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CMC	Compósitos cimento-madeira
CO ₂	Dióxido de carbono
CP BC	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
CP I	Cimento Portland Comum
CP II	Cimento Portland Composto
CP III	Cimento Portland de Alto-Forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP RS	Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP0	Corpo de prova com 0% de fibra de madeira, sem aditivo
CP0A	Corpo de prova com 0% de fibra de madeira, com aditivo
CP10	Corpo de prova com 10% de fibra de madeira, sem aditivo
CP10A	Corpo de prova com 10% de fibra de madeira, com aditivo
CP15	Corpo de prova com 15% de fibra de madeira, sem aditivo
CP15A	Corpo de prova com 15% de fibra de madeira, com aditivo
CP20	Corpo de prova com 20% de fibra de madeira, sem aditivo
CP20A	Corpo de prova com 20% de fibra de madeira, com aditivo
CP5	Corpo de prova com 5% de fibra de madeira, sem aditivo
CP5A	Corpo de prova com 5% de fibra de madeira, com aditivo
CPB	Cimento Portland Branco
EVA	Etil vinil acetato
FDC	Fundação Dom Cabral
FGV	Fundação Getulio Vargas
GEE	Gás de efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MOC	Cimento de oxidoreto de magnésio
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
NBR	Normas Brasileiras
ONU	Organização das Nações Unidas
PEVS	Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura
PFS	Ponto de saturação das fibras
PIB	Produto interno bruto
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
RCD	Resíduos de construção e demolição
RILEM	<i>The International Union of Testing and Research Laboratories for</i>

Materials and Structures

SindusCon-SP	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WCP	painéis de cimento-madeira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo geral.....	17
1.2	Objetivos específicos.....	18
1.3	Justificativa.....	18
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Contextualização do tema	19
2.1.1	Aspecto ambiental	19
2.1.2	Aspecto social	21
2.1.3	Aspecto econômico e tecnológico	23
2.2	Materiais compósitos.....	23
2.2.1	Definição e composição	23
2.2.2	Matriz e reforço.....	24
2.3	Aglomerantes.....	27
2.3.1	Cimento Portland.....	28
2.3.2	Tipos de cimento Portland	29
2.3.3	Hidratação do cimento Portland	31
2.3.4	Compatibilidade entre o cimento e a madeira	32
2.3.5	Incompatibilidade entre o cimento e a madeira	32
2.3.6	Efeito do tipo de cimento em compósitos madeira-cimento	33
2.3.7	Cimento Portland de alta resistência inicial - CPV-ARI	36
2.3.8	Relação água/cimento (a/c).....	36
2.3.9	Tempo de cura	35
2.4	Agregados.....	36
2.4.1	Madeira <i>Pinus</i> spp.....	36
2.4.2	Compósitos com Madeira <i>Pinus</i> spp.	37
2.4.3	Caracterização física da madeira	38
2.4.4	Relação madeira/cimento	40
2.4.5	Relação cimento/areia/madeira	41
2.4.6	Caracterização física da areia	42
2.5	Tratamentos e aditivos	44
2.5.1	Tratamentos	46
<u>2.5.1.1</u>	<u>Extração com água quente, fria e soluções alcalinas.....</u>	<u>46</u>
2.5.2	Aditivos.....	48

2.5.2.1	Aditivos aceleradores de pega	49
2.6	Ensaio físico-mecânico nos compósitos	50
2.6.1	Módulo de Elasticidade (MOE) Dinâmico	50
2.6.2	Módulo de Elasticidade (MOE)	51
2.6.3	Módulo de Ruptura (MOR)	52
2.6.4	Resistência à tração perpendicular à superfície	52
2.6.5	Resistência à tração na flexão e à compressão	53
2.6.6	Índice de consistência	54
2.6.7	Densidade de massa aparente no estado endurecido	54
2.6.8	Absorção de água por capilaridade	56
2.6.9	Resistência à compressão – Cimento Portland	57
2.6.10	Absorção de água, índices de vazios e massa específica	59
3	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1	Materiais	60
3.1.1	Cimento Portland CP V-ARI	60
3.1.2	Madeira em Pó	61
3.1.3	Água	61
3.1.4	Aditivo acelerador de pega	62
3.2	Métodos	62
3.2.1	Dosagem e amostragem	62
3.2.2	Composição granulométrica e o módulo de finura: agregado miúdo	64
3.2.3	Composição granulométrica e o módulo de finura: madeira <i>Pinus</i> spp.	65
3.2.4	Densidade de massa aparente no estado endurecido	65
3.2.5	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	66
3.2.6	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	67
3.2.7	Resistência à tração na flexão e à compressão	68
3.2.8	Módulo de elasticidade (MOE) dinâmico	71
3.2.9	Módulo de Elasticidade (MOE) estático	73
3.2.10	Módulo de Ruptura (MOR)	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	Caracterização dos materiais	75
4.2	Densidade de massa aparente no estado endurecido	77
4.3	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	79
4.4	Absorção de água por imersão, índices de vazios e massa específica	81
4.5	Resistência à tração na flexão	82

4.6	Resistência à compressão	85
4.7	Módulo de elasticidade (MOE) dinâmico	88
4.8	Módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR)	90
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 apresentou dezessete metas de desenvolvimento sustentável para serem cumpridas até 2030 pelos países e pela população global. A décima segunda meta possui o objetivo de assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, ou seja, pretende-se até 2030 alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais (ONU, 2020). De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), o setor da construção civil tem um papel fundamental para a realização dos objetivos globais do desenvolvimento sustentável (MMA, 2020). Porém, o Conselho Internacional da Construção (CIB) aponta a indústria da construção como o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, com consideráveis impactos negativos ao meio ambiente (CIB, 2020). Isto ocorre porque, segundo a UNEP (*United Nations Environment Programme*), as edificações respondem por 40% do consumo global de energia e por até 30% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEEs) relacionadas ao consumo de energia (WWF, 2017).

Segundo o instituto de pesquisa britânico *Chatham House*, o cimento é fonte de aproximadamente 8% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂). As fases produtivas da indústria cimentícia correspondem a aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa (CSI, 2002). Nas emissões específicas da indústria do cimento, aproximadamente 50% referem-se ao processo produtivo, cerca de 5% ao transporte, 5% ao uso da eletricidade e os outros 40% ao processo de clinkerização (WBCSD, 2002). Em virtude desse nível de emissão alarmante, promovido apenas por um tipo de indústria, a COP24 – Conferência da ONU sobre mudanças climáticas -, realizada na Polônia em 2018, debateu esse problema com diversos representantes do setor, com o intuito de atender ao disposto no Acordo de Paris, onde foi acordado um compromisso mundial para reduzir a emissão de gases na atmosfera. Sendo assim, a indústria do cimento teria que, até 2030, reduzir em pelo menos 16% a emissão anual promovida pelo material. Algo difícil de ser cumprido na prática, principalmente porque a maioria dos projetos de construção civil usa o cimento (ONU, 2018).

No Brasil, a participação do setor nas emissões nacionais é de 2,3%, cerca de um terço da média mundial (ABCP, 2021; CNI, 2021). No ano de 2022, segundo

dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), foram produzidas 63.545.862 toneladas de cimento. As expectativas da indústria do cimento no Brasil para o ano de 2023 são de um crescimento na demanda de 0,8% em relação ao ano anterior.

No cenário atual, em que as questões ambientais estão em ênfase, intensifica-se a conscientização do uso consciente dos recursos naturais. As fibras e/ou farinha vegetais aparecem nesse cenário como uma excelente alternativa para a substituição total ou parcial de outros insumos na produção de produtos para construção civil, principalmente do cimento como aglomerante em compósito cimento-madeira (CMC). Isso se torna uma alternativa técnica, ambiental e econômica para minimizar a emissão de CO₂.

Os materiais compósitos são desenvolvidos combinando dois ou mais insumos entre si, melhorando as características um do outro, como é o caso do CMC. Sua produção utiliza uma quantidade menor de materiais que consomem energia durante a produção e há, ainda, a possibilidade de reutilizar resíduos.

Os CMCs podem ser descritos como argamassas de cimento Portland em que parte ou toda a composição do aglomerante (cimento) na mistura é substituída por material vegetal orgânico, que pode ser obtido por separação mecânica de tecidos lenhosos de plantas superiores ou coleta de resíduos da indústria madeireira e/ou da construção civil (MACÊDO *et al.*, 2011).

Segundo os dados da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil alcançou em 2021 o maior patamar em quase uma década de produção de madeira em toras extraídas de matas e florestas (IBGE, 2021). Isso resulta em um salto de 30,13% na extração de madeira em tora da natureza em relação ao montante produzido em 2020, o equivalente a 3,429 milhões de metros cúbicos a mais, e vem crescendo ano a ano. Para Garcez *et al.* (2016), o fato de o Brasil ter alta produção de madeira em toras, gera, na mesma proporção, altas quantidades de resíduos. Segundo Fagundes (2003), o aproveitamento de uma tora de madeira em tábuas se dá na ordem de 40%, sendo que, os 60% restantes caracterizam-se como resíduos (10% resíduos de plaina, 26% resíduos do corte, 11% casca e 13% pó de serra, além das perdas devido à presença dos defeitos). Para Souza (2006), o uso do resíduo não passa dos limites industriais, servindo de combustível para geração de

energia ou, algumas vezes, de forração para pisos de granjas, os quais podem ser utilizados na produção de CMCs.

Nesse contexto, têm se intensificado pesquisas a respeito da utilização de resíduos de madeira no reforço de matrizes à base de cimento, em diversos formatos: fibras (ONUAGULUCHI *et al.*, 2016; PEÇAS *et al.*, 2018), cavacos (PARCHEN, 2012; PARCHEN *et al.*, 2016), partículas de troncos, folhagens, farinha de madeira (MATOSKI, 2005; CASTRO *et al.*, 2014; WEBER *et al.*, 2017), serragem (GARCEZ *et al.*, 2016) e resíduos (LIMA, 2009; MAQUINÉ, 2020).

Os CMCs possuem diversas vantagens. No âmbito ambiental, diminuem a emissão de CO₂ em sua produção, pois proporcionam a redução de uso de cimento com a substituição por madeira, na produção de um material novo a partir de resíduos vegetais (FRYBORT *et al.*, 2008). Além disso, a baixa toxicidade na produção de painéis é uma vantagem, pois não se utiliza resina, em comparação com painéis constituídos apenas de madeira (MACÊDO *et al.*, 2011; LATORRACA, 1996). No aspecto econômico, destaca-se a facilidade de moldagem, serragem, corte, fixação e acabamento, permitindo o uso de compósitos na produção de painéis, forros, telhas, elementos de vedação, piso e blocos não estruturais. (PIMENTEL, 2000; BERALDO *et al.*, 2004). Em comparação ao concreto, o compósito é relativamente mais leve, e isso o torna um produto de boa trabalhabilidade, além de resultar em menores custos de transporte e manuseio. No aspecto tecnológico, é possível produzir componentes esbeltos, com bom desempenho mecânico e termoacústico (BERALDO, CHEN, AZZINI, 2003; WEBER *et al.*, 2017). Além disso, podem ser fabricados painéis com baixa densidade em comparação a outras placas cimentícias (VILLAS-BÔAS *et al.*, 2017).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de CMCs de baixa densidade, utilizando farinha de madeira *Pinus* spp.

1.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades físicas e mecânicas na produção de CMCs de baixa densidade utilizando farinha de madeira *Pinus* spp. com cimento Portland.

1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar os teores de adição de madeira e adição de aditivo em relação às propriedades físicas e mecânicas do CMC.
- b) Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do CMC.

1.3 Justificativa

A partir do avanço da tecnologia, vêm sendo desenvolvidos e produzidos cada vez mais materiais que, combinadas suas propriedades, sejam capazes de superar ou substituir outros materiais - além da busca por materiais que no processo produtivo e construtivo apresentem baixo consumo de energia e concomitantemente, uma baixa quantidade de carbono em forma de CO₂. Nas construções atuais, essa característica tem sido imprescindível, tendo em vista que a concentração de CO₂ na atmosfera está aumentando e contribuindo para o aquecimento global (ROCHA, 2017; ROCHA, MIRANDA, 2019).

O CMC já é amplamente utilizado na Europa, nos Estados Unidos, na Rússia e no Sudeste Asiático, principalmente na produção de telhados, pisos e paredes (SOARES *et al.*, 2007). Além disso, é alvo de vários grupos de pesquisa que estão avaliando sua adequação para diferentes materiais lignocelulósicos, como ciprestes (OKINO *et al.*, 2005), seringueira (OKINO *et al.*, 2004), eucalipto (OKINO *et al.*, 2004; LATORRACA, 2000), pinheiros (CABANGON, CUNNINGHAM, EVANS, 2002), acácia (EUSEBIO *et al.*, 2002), resíduos agrícolas (ALMEIDA *et al.*, 2002), fibra (DEL MENEZZI *et al.*, 2001) e bambu (CECHIN *et al.*, 2018). Isso ocorre porque possui diversas vantagens em comparação ao material de origem: alta durabilidade, boa estabilidade dimensional, propriedades de isolamento acústico e térmico e baixo custo de produção (SOARES *et al.*, 2007).

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, será realizada uma revisão da literatura sobre os assuntos pertinentes ao desenvolvimento da pesquisa em questão. Inicialmente, será explanado a respeito da contextualização do tema e definição de materiais compósitos. Após, serão abordados os aspectos principais dos materiais que serão utilizados na pesquisa: aglomerantes e agregados. Serão apresentados os principais tipos de tratamentos e aditivos aplicados na produção de CMCs. Finalizando com os principais ensaios físico-mecânicos realizados em CMCs.

2.1 Contextualização do tema

Painéis CMCs não são um conceito novo, pois já eram utilizados como elementos construtivos na Europa no início do ano 1900, na Áustria. Na Europa, surgiram como elementos construtivos no final dos anos setenta do século XX. Foi, porém, durante a Segunda Guerra Mundial que os materiais usuais da construção civil, como metal e madeira sólida, passaram a ser considerados estratégicos, limitando a demanda de uso. No início da década de 1960, um painel estrutural de alta densidade ligado a cimento foi desenvolvido, levando a aplicações expandidas. Hoje, os painéis de cimento-madeira (WCP) são aceitos em vários países como resultado de certas características desejáveis. (MOSLEMI *et al.*, 1987).

2.1.1 Aspecto ambiental

A ONU em 2015 apresentou dezessete metas para serem cumpridas até 2030 pelos países e população global, com intuito de erradicar a pobreza, promover a prosperidade e o bem-estar para todos, proteger o meio ambiente e enfrentar as mudanças climáticas. A décima segunda meta de desenvolvimento sustentável tem como objetivo assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. Assim, pretende-se até 2030 alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. Além disso, incentivar as empresas, especialmente as grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios (ONU, 2020).

De acordo com o MMA, o setor da construção civil tem papel fundamental para a realização dos objetivos globais do desenvolvimento sustentável. Os principais desafios são: a otimização do consumo de materiais e energia, a redução dos resíduos gerados, a preservação do ambiente natural e a melhoria da qualidade do ambiente construído. Dentre as principais recomendações do MMA está a busca de soluções que potencializem o uso racional de energia ou de energias renováveis, a redução do uso de materiais com alto impacto ambiental e a redução dos resíduos da construção com modulação de componentes para diminuir perdas e especificações que permitam a reutilização de materiais (MMA, 2020).

O CIB aponta a indústria da construção como o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, com consideráveis impactos negativos ao meio ambiente. Além do consumo de matéria e energia, existem os impactos relacionados à produção de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Em relação aos resíduos sólidos gerados, estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção (CIB, 2020).

Segundo dados do relatório sobre a gestão da sustentabilidade na construção civil, divulgado pela Fundação Dom Cabral (FDC), 75% de todos os recursos naturais e 44% da energia produzida no país são consumidos na construção civil (FDC, 2020). Além disso, estima-se que, no Brasil, a construção civil produz o equivalente a 500 kg de resíduo por habitante ao ano (CBCS, 2014; IPT, 1998). Nos últimos anos, esses valores vêm aumentando, chegando a 800 kg por habitante ao ano em alguns estados (ABRELPE, 2019). Em relação às emissões de CO₂, a cadeia produtiva da construção também tem grande peso. Segundo a UNEP, as edificações respondem por 40% do consumo global de energia e por até 30% das emissões globais de GEEs relacionadas ao consumo de energia (WWF, 2017).

Onuaguluchi *et al.* (2016) acreditam que a indústria da construção civil não é apenas uma grande consumidora de energia e matérias-primas, mas também contribui para a poluição ambiental, principalmente GEEs. A fim de contribuir para a sustentabilidade na questão do uso de materiais e insumos, a indústria da construção deve adotar a reutilização de subprodutos industriais e materiais renováveis.

Em um cenário em que se intensificou a utilização de recursos naturais para a produção de materiais da construção civil e são recorrentes as preocupações com

as questões ambientais, surge a necessidade do desenvolvimento de novos materiais, bem como da utilização e reaproveitamento de resíduos. O compósito constituído de biomassa vegetal e matriz cimentícia pode ser uma opção para reduzir os impactos ambientais negativos, principalmente na questão energética, emissão de CO₂ e redução de resíduos provenientes da construção civil.

Para Castro *et al.* (2014) e Parchen (2012), o consumo energético e a emissão de carbono na forma de CO₂ são baixos, tanto no processo produtivo quanto no construtivo do compósito de biomassa vegetal e matriz cimentícia, além do fato de a biomassa vegetal ser uma fonte inesgotável, renovável e com grande disponibilidade de recursos naturais (MESA VALENCIANO, 2004; BERALDO, CARVALHO, 2004). Em comparação das energias requeridas para se obter uma unidade de diferentes materiais utilizados na construção civil (Tabela 1), a madeira demonstrou ser o segundo material de mais baixo consumo energético, pois não necessita de transformação e possui naturalmente forma adequada, acabamento e resistência (GHAVAMI, 1992 *apud* MURAD, 2007).

Tabela 1 – Consumo energético por material

Material	Energia (MJ/m³)
Aço	1.500
Concreto	240
Madeira	80
Bambu	30

Fonte: Ghavami (1992) *apud* Murad (2007, p. 22)

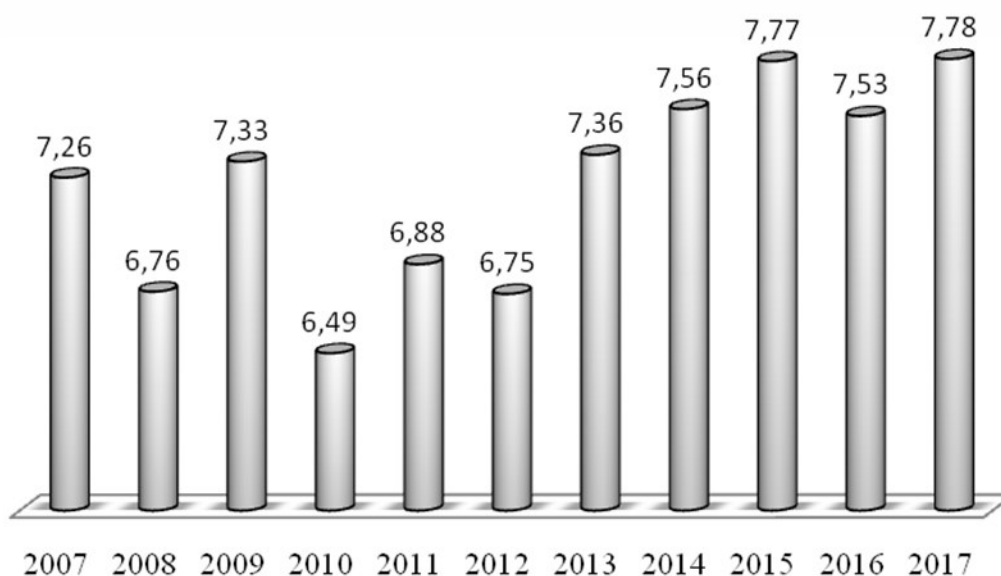
2.1.2 Aspecto social

De acordo com a Organização das Nações Unidas, atualmente 1,6 bilhão de pessoas no mundo não possuem moradia. O montante refere-se ao déficit habitacional, que indica a escassez de unidades habitacionais. O cálculo leva em conta as moradias existentes, porém inadequadas, e as habitações que estão localizadas em assentamentos informais ou favelas. Para a ONU, se não houver empenho dos governos na formulação de políticas públicas eficazes, o déficit deve alcançar, em 2030 – ano de cumprimento das dezessete metas de desenvolvimento

sustentável, pelos países e população global – o valor aproximado de 3 bilhões de moradias (ONU, 2020).

No Brasil, de acordo com o levantamento realizado pela Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (ABRAINC), em parceria com a Fundação Getulio Vargas (FGV) e com o apoio do Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (SindusCon-SP), precisam ser construídas, até 2027, 11,982 milhões de moradias para eliminar o déficit habitacional no Brasil, estimado em 7,77 milhões de unidades (Figura 1). O cálculo leva em conta habitações precárias, coabitação familiar e adensamento excessivo, ou seja, cômodos cedidos ou alugados e impropriamente ocupados como domicílios. A maior parte do déficit está nas famílias que ganham até três salários-mínimos por mês. Dessa maneira, a pressão por políticas públicas voltadas ao atendimento das necessidades habitacionais das famílias mais pobres será tão intensa quanto mais lento for o crescimento da renda agregada (produto interno bruto - PIB) na economia (ABRAINC, FGV, 2018).

Figura 1 - Evolução do déficit habitacional (em milhões de unidades)



Obs.: A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) deixou de ser anual em 2015.

Fonte: Adaptado de ABRAINC, FGV (2018) e IBGE (2015)

A necessidade de moradias é evidente tanto em países desenvolvidos quanto em subdesenvolvidos, como já apresentado anteriormente. A produção de materiais para esta demanda construtiva também é outra necessidade, principalmente quando são de baixo custo no seu processo produtivo e construtivo.

O compósito de biomassa vegetal e matriz cimentícia torna-se uma opção para este contexto, principalmente para moradias de baixa renda. Esses compósitos são constituídos de resíduos renováveis de fácil obtenção, propriedades e desempenho compatíveis com a necessidade de conforto ambiental, baixo custo no processo produtivo e construtivo. Além disso, sua produção requer o mesmo tipo de mão de obra e equipamentos empregados nas indústrias de artefatos de cimento Portland.

2.1.3 Aspecto econômico e tecnológico

O interesse em obter maior nível de racionalização e produtividade nos serviços de vedação vertical e a utilização de painéis industrializados vêm se intensificando nos últimos anos. Isso ocorre porque a utilização de painéis modulares em obra permite a eliminação de diversas etapas. Além da precisão geométrica, a variedade de dimensões, as formas de acabamento, a incorporação de revestimentos em escala industrial e a facilidade de montagem são outras vantagens que podem contribuir para a utilização de painéis como elementos construtivos (Tanigutti, Barros, 1998; Matoski, 2005).

A produção de compósitos de biomassa vegetal e matriz cimentícia em formato de painéis modulares pode ser uma opção tanto para vedação vertical quanto para acabamento na construção civil. Além de possuir baixo custo de produção, dispensando complicadas e caras linhas de produção.

2.2 Materiais compósitos

2.2.1 Definição e composição

Um material compósito é uma composição de materiais, podendo ter dois ou mais materiais constituintes, com propriedades físicas ou químicas diferentes, e quando combinados produzem um material que possui características únicas e diferentes dos elementos constituintes. Em geral, a junção deles resulta em um material de propriedades superiores comparadas aos materiais originais, quando analisados de forma isolada. Na construção civil, o concreto armado é um exemplo de material compósito. A matriz é responsável por conferir a estrutura do compósito, enquanto o reforço garante as propriedades físicas/químicas e realça alguma propriedade desejada no compósito (RAJAK *et al.*, 2019; CECHIN, 2018; VASILIEV; MOROZOV, 2001 *apud* CECHIN, 2017; CALISTER JR., RETHWISCH, 1997).

Os Egípcios já usavam materiais compósitos de fibras naturais como o papiro para fazer barcos, velas e cordas desde o ano 4000 a.C. Nos tempos pré-históricos, já eram produzidos tijolos a partir da mistura de cascas de trigo ou arroz com argila, com o propósito de reduzir a incidência de trincas e melhorar seu desempenho (MOSLEMI, 1989). Os israelitas também usavam palha para reforçar tijolos de barro há mais de 1500 a.C. Este método ainda é utilizado em algumas regiões no mundo e no Brasil (VENTURA, 2009).

Na indústria aeroespacial, os materiais compósitos são utilizados na produção de pás da hélice principal, hélice traseira, árvore de transmissão, fuselagem dos helicópteros e aeronaves, estrutura de foguetes e nos painéis solares de satélites. No setor automobilístico, na produção de para-choques, teto, fabricação de capôs, colunas de direção, árvores de transmissão, molas laminadas e painéis. No setor esportivo, na fabricação de tacos de golfe, raquetes de tênis, pranchas de surf, varas de pescar e barcos a vela. Na indústria bélica, na produção de armamentos e em proteção balística, onde são fabricados capacetes, coletes de blindagem e blindagem para carros de combates (carbono). Nas indústrias químicas e petrolíferas, são utilizados os compósitos na fabricação de estruturas tubulares cilíndricas, para o transporte de fluidos a altas temperaturas e pressões. Na medicina, na confecção de próteses ortopédicas externas e internas (carbono) (REZENDE, BOTELHO, 2000).

2.2.2 Matriz e reforço

Os materiais compósitos normalmente são classificados pelo material que constitui a matriz (fase contínua) que envolve o reforço (fase dispersa) (VENTURA, 2009). Segundo Rajak *et al.* (2019), são três classes: compósitos com matriz polimérica, compósitos com matriz cerâmica e compósitos com matriz metálica. As suas características dependem da propriedade física e fatores inerentes à fase dispersa como: concentração, tamanho, forma e orientação do reforço (VENTURA, 2009). Tanto a matriz (aglutinante) quanto o reforço não perdem suas identidades individuais, ao contrário, eles combinam e contribuem sinergicamente com suas características para melhorar as propriedades do produto (RAJAK *et al.*, 2019).

A matriz pode ser constituída de um metal, polímero ou cerâmico. Pode ser dúctil (tipo orgânica ou polimérica) ou frágil (tais como as cimentícias e as matrizes de vidro). Com a função de preencher os vazios existentes no reforço e manter sua

posição desejada, a matriz se constitui no meio de transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço, podendo ser formada por diversos tipos de materiais de engenharia, desde que cumpram a função de manter a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas de fibras e fornecer proteção ao elemento de reforço contra danos superficiais (MANO, 2000).

Os compósitos com matriz polimérica são constituídos por muitas partes, unidas ou ligadas quimicamente entre si, de modo a formar um sólido. São compostos de polímeros termoendurecíveis (termorrígidos) ou termoplásticos com reforço disperso de carbono, vidro, Kevlar e fibras metálicas (RAJAK *et al.*, 2019).

Os compósitos com matriz cerâmica são tipos de cerâmica geralmente compostas de fibras de carbono, carboneto de silício (SiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de silício (SiN) incorporadas na estrutura da matriz cerâmica (RAJAK *et al.*, 2019). Possuem resistência à oxidação e à deterioração sob temperaturas elevadas, porém têm predisposição a fratura. São referidos como compostos inversos, porque em condições de carregamento, é a matriz que falha primeiro, a fim de evitar uma falha precoce das fibras quebradiça (NASLAIN, 2001).

Os compósitos com matriz metálica material são compostos de material compulsoriamente metálico, constituídos principalmente por alumínio (Al), magnésio (Mg), cobre (Cu) ou titânio (Ti). O reforço pode ser cerâmica dispersa com óxidos e carbonetos ou metálico. Por exemplo: tungstênio, molibdênio e chumbo (RAJAK *et al.*, 2019). Possuem as vantagens de alta resistência ao desgaste, módulo de elasticidade (MOE) e alta resistência em relação ao peso, rigidez, material de baixa densidade, alta estabilidade térmica e condutividade. São amplamente utilizados em grandes indústrias, como aeroespacial e automotiva, em mangas de cilindros de motores e quadros de bicicletas (LI, LAGHARI, 2019).

Os materiais compósitos também podem ser classificados de acordo com os reforços e a escala (RAJAK *et al.*, 2019; ERDEN, HO, 2017). Em relação ao reforço, pode ser um material orgânico ou inorgânico, ter forma regular ou irregular, ser fibroso ou pulverulento (esférico ou cristalino), com fragmentos achatados (como flocos) ou com fibras muito curtas, ter dimensões quase moleculares ou de material cristalino (MANO, 2000). Normalmente são constituídos por fibras, a exemplo de vidro, carbono, aramida, polipropileno, aço, crina de cavalo, celulose, entre outras (MARTINEAU, AGOPYAN, 2002; SANTIAGO, 2002). Isso, porque as fibras

desempenham o papel de suportar as cargas máximas e impedem que as deformações ultrapassem os limites aceitáveis de matrizes frágeis, como de cimento, cal ou gesso (BERNARDI, 2003; MARTINEAU, AGOPYAN, 2002).

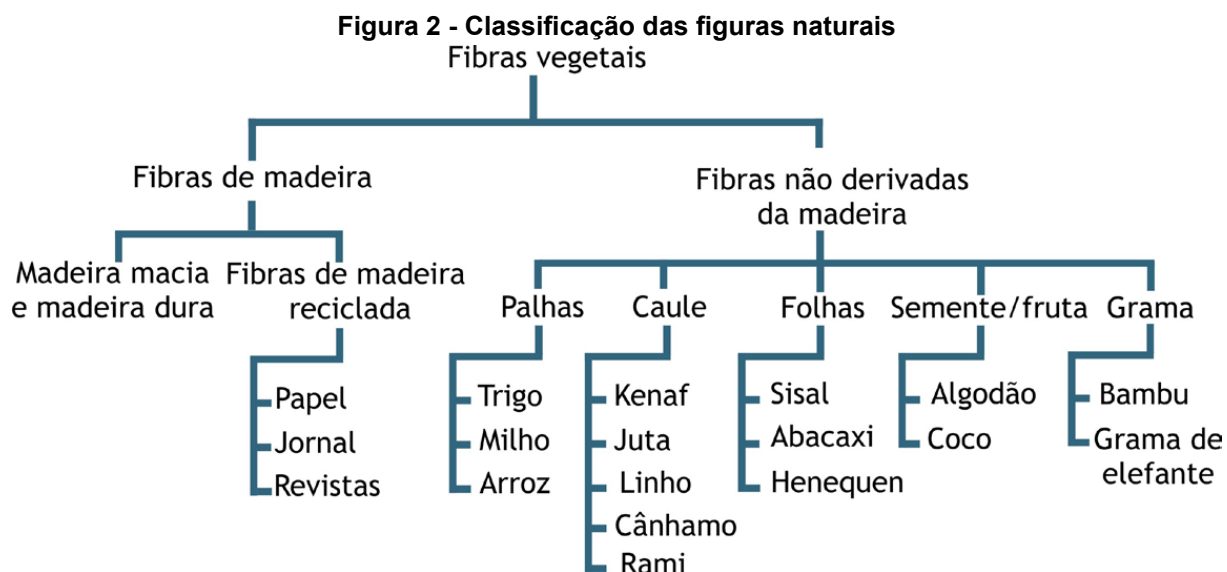
A fase dispersa ou reforço geralmente é classificada em três categorias: compósitos particulados, em que as partículas estão inseridas na matriz; compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*) e contínuas, no qual as fibras se encontram distribuídas na matriz cimentícia; e estrutural laminado, que consiste em várias camadas de materiais diferentes. Sua função é realçar uma propriedade específica ou proporcionar força, rigidez e aumento de resistência ao calor, corrosão e condutividade (CECHIN, 2018; VENTURA, 2009).

Para Ventura (2009), as fibras como reforço constituem uma classe importante, por proporcionar o aumento da força da matriz e concomitantemente realçar e influenciar as propriedades nas duas fases. O arranjo destas fibras, sua distribuição e concentração influenciam significativamente na resistência do compósito.

Nos últimos anos, várias questões ambientais surgiram a respeito do uso de fibras sintéticas, porque as fibras de carbono e de vidro não são facilmente biodegradáveis, o que leva à poluição ambiental. Além disso, a fabricação de fibras sintéticas consome muita energia, o que aumenta os custos de produção e material, tornando os compósitos reforçados com fibras menos acessíveis para materiais de construção. Com isso, a fibra natural tem sido considerada uma alternativa, principalmente por ser um material leve, renovável, biodegradável, de baixo custo, baixo consumo de energia e disponibilidade abundante (CHIN *et al.*, 2020).

O estudo sistemático de fibras com a finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra, em 1970. No Brasil, a pesquisa pioneira coube ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED), Camaçari, Bahia, com início em 1980 (CAMPELLO, 2006). Segundo Onuaguluchi e Banthia (2016), as fibras naturais são classificadas com base em sua origem, existindo três tipos disponíveis para reforço de compósitos de matriz cimentícia: origem animal, origem mineral e origem vegetal. As fibras de origem animais, compreendem proteínas específicas, incluem seda, lã e fibra capilar. As fibras derivadas de minerais incluem amianto, volastonita e paligorskita. As fibras vegetais incluem algodão, cânhamo, juta, linho, rami, sisal, bagaço, bambu e fibras especiais processadas a partir de madeira.

Para Gurunathan *et al.* (2015), dos três tipos de fibras naturais, as fibras vegetais são as mais utilizadas como reforço em compósitos, podendo ser provenientes da madeira ou não. As derivadas de madeira podem ser extraídas de madeiras macias ou duras ou ainda podem ser recicladas. As não derivadas de madeira podem ser extraídas de diversas partes das plantas, como ilustrado na Figura 2.



Fonte: Gurunathan *et al.* (2015)

Os materiais compósitos classificados em relação à escala são chamados de Nanocompósitos. O seu conceito consiste em criar uma interface muito grande entre os blocos de construção e a matriz polimérica (HÁRI, PUKÁNSZKY, 2011). Assim, as propriedades desejadas do material podem ser alcançadas combinando dois ou mais materiais distintos em nanoescala, resultando na formação de um novo material chamado nanocompósito (RAJAK *et al.*, 2019). Os principais problemas dos nanocompósitos são geralmente a distribuição homogênea das partículas na matriz polimérica e as interações interfaciais (HÁRI, PUKÁNSZKY, 2011; BALEA *et al.*, 2019).

2.3 AGLOMERANTES

Os aglomerantes são materiais com propriedades ligantes, em geral, são pulverulentos (em forma de pó), e na presença da água, se transformam em pasta

que endurece por processos químicos devido às reações químicas ou por simples secagem. Por possuírem propriedades aglutinantes, são utilizados, também, para ligar agregados, formando um corpo sólido e coeso, influenciando assim a resistência do material resultante. Os aglomerantes mais utilizados na construção civil são a cal, o gesso e o cimento Portland (RIBEIRO *et al.*, 2002).

O aglomerante, em contato com água, forma uma pasta moldável e maleável. Ao se acrescentar areia a esta pasta, forma-se uma argamassa, que posteriormente torna-se rígida e resistente. Se adicionar brita a esta argamassa, forma-se o concreto.

Os aglomerantes são classificados como: poliméricos, aéreos e hidráulicos. Os poliméricos são os aglomerantes que reagem devido à polimerização de uma matriz. Os aéreos são os aglomerantes que endurecem pela ação química do CO₂ no ar, como por exemplo a cal aérea. Os hidráulicos são aglomerantes que endurecem pela ação exclusiva da água como por exemplo a cal hidráulica e o cimento Portland. Os três principais tipos de aglomerantes utilizados na construção civil são os inorgânicos (gesso, cal); hidráulicos (cal hidratada ou hidráulica e cimento Portland) e orgânicos (resina epóxi e acrílica, poliméricos, derivados da destilação do petróleo e betuminosos) (RIBEIRO *et al.*, 2002).

Na produção de compósitos à base de cimento e madeira, é utilizado o cimento Portland como aglomerante ligante entre o agregado mineral e o material orgânico vegetal (madeira) na argamassa. Este compósito pode ser definido como uma argamassa de cimento Portland na qual parte ou toda a fração do agregado mineral é substituída por material orgânico vegetal, podendo ser obtido pela fragmentação mecânica do tecido lenhoso de vegetais superiores ou através da coleta de resíduos da indústria madeireira.

2.3.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico pulverulento, produzido a partir da moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos e aluminatos de cálcio, com adição de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio hidráulicos como produto de adição (CASTRO, 2021). O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. As adições (gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) podem variar de um tipo

de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento (BARACHO JUNIOR, 2016).

O termo aglomerante é empregado, pois o material possui a capacidade de promover adesão. É também hidráulico, pois ao reagir com água e adquirir resistência, produz substâncias chamadas de produtos hidratados, que são estáveis na presença de água (FONSECA, 2005). Durante o processo de moagem, é permitido adicionar materiais pozolânicos e carbonáticos nos teores indicados pela norma NBR 11578 (ABNT, 1997). Quando misturados com água, hidratam-se e formam pastas ligantes, permanecendo maleável por cerca de 1,5 horas. Posteriormente endurecem e adquirem elevadas resistências mecânica ao longo do tempo. O cimento Portland é uma das principais matérias-primas em matrizes de compósitos, em virtude de sua versatilidade e durabilidade (LIMA, 2019; CASTRO, 2021).

2.3.2 Tipos de cimento Portland

A constituição química e as diferentes proporções entre os constituintes fundamentais do cimento desempenham um papel fundamental nas características do CBVC. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2023), o mercado nacional dispõe de oito opções que atendem aos mais variados tipos de utilizações: Cimento Portland Comum (CP I); Cimento Portland Composto (CP II); Cimento Portland de Alto-Forno (CP III); Cimento Portland Pozolânico (CP IV); Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI); Cimento Portland Resistente a Sulfatos (CP RS); Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CP BC); Cimento Portland Branco (CPB). Os tipos de cimentos se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer, sulfatos de cálcio e adições (escórias, pozolanas e material carbonático) acrescentadas no processo de moagem.

Os tipos de cimento podem diferir também em função de propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial e tonalidade. O CP I, por exemplo, pode conter adição de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou carbonato de cálcio e o restante de clínquer. Já o CPI-S pode conter de 6% a 10% de material carbonático. O CP II-E, CP II-Z e CP II-F) tem adições de escória, pozolana e fíler, respectivamente, mas em proporções um pouco maiores que no CP I e no CP I-S. O

CP III e o CP IV contam com proporções maiores de adições: escória, de 35% a 75% (CP III), e pozolana, de 15% a 50% (CP IV) (Tabela 2).

Tabela 2 - Tipos básicos de Cimento Portland e suas especificações

Nome Técnico – Sigla - Norma	Adições			
	Escória	Pozolana	Fíler	Materiais carbonáticos
Cimento Portland Comum - CP I - NBR 5732 (ABNT, 1991a)	-	-	-	-
Cimento Portland Comum com Adição - CP I-S - NBR 5732 (ABNT, 1991a)	0% – 5%	0% – 5%	0% - 5%	0% – 5%
Cimento Portland Composto com Escória - CP II-E - NBR 11578 (ABNT, 1997)	6% - 34%	-	-	0% - 10%
Cimento Portland Composto com Pozolana - CP II-Z - NBR 11578 (ABNT, 1997)	-	6% - 14%	-	0% - 10%
Cimento Portland Composto com Fíler - CP II-F - NBR 11578 (ABNT, 1997)	-	-	6% - 10%	0% - 10%
Cimento Portland de Alto-Forno - CP III - NBR 5735 (ABNT, 1991b)	35% - 70%	-	-	0% - 5%
Cimento Portland Pozolânico - CP IV - NBR 5736 (ABNT, 1999)	-	15% - 50%	-	0% - 5%
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V-ARI - NBR 5733 (ABNT, 1991c)	-	-	-	0% - 5%
Cimento Portland Resistente a Sulfatos - RS - NBR 5737 (ABNT, 1992)	-	-	-	-
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação - BC - NBR 13116 (ABNT, 1994)	-	-	-	-
Cimento Portland Branco - CPB - NBR 12989 (ABNT, 1993)	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de ABCP (2023)

A partir de 2018, todos os tipos de cimento foram reunidos em uma única norma de especificação, a NBR 16697 (ABNT, 2018). Embora seja possível ajustar esses diversos tipos de cimento às mais diversas aplicações, por meio de dosagens adequadas, a análise de suas características e propriedades mostra que certos tipos são mais apropriados para determinadas aplicações (Tabela 3).

Segundo Librelotto *et al.* (2019), a constituição química e as diferentes proporções entre os constituintes fundamentais do cimento desempenham um papel fundamental nas características dos compósitos de biomassa vegetal-cimento.

Tabela 3 - Limites de composição do Cimento Portland (% em massa)

Sigla		Classe de resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozzolânico	Material carbonático
CP I			95-100%		0-5%	
CP I-S			90-94%	-	-	6-10%
CP II-E			51-94%	6-34%	-	0-15%
CP II-Z		25, 32 ou 40 MPa	71-94%	-	6-14%	0-15%
CP II-F			75-89%	-	-	11-25%
CP III			25-65%	35-75%	-	0-10%
CP IV			45-85%	-	15-50%	0-10%
CP V		ARI	90-100%	-	-	0-10%
CPB	Estrutural	25, 32 ou 40 MPa	75-100%	-	-	0-25%
	Não estrutural	-	50-74%	-	-	26-50%

Fonte: Adaptado de ABCP (2023)

2.3.3 Hidratação do cimento Portland

A hidratação do cimento Portland é a reação entre um cimento não-hidratado, ou um de seus componentes, com água, associado tanto com a mudança química quanto físico-mecânica do sistema, e, em particular, com a cura e o endurecimento (CASTRO, 2021). De forma simples, na presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o decorrer do tempo, produzem uma massa firme e resistente, dando origem à pasta de cimento endurecida (NEVILLE, 1997).

A hidratação pode ocorrer de duas maneiras, pela incorporação direta das moléculas de água nos compostos do cimento ou pela hidrólise. O progresso da hidratação pode ser influenciado por uma série de fatores como: a composição e granulometria do cimento, a relação água/cimento (a/c), a temperatura de cura e a presença de misturas e/ou aditivos na pasta (ODLER, 2003).

A “cura” do cimento significa que houve uma perda repentina de plasticidade da pasta original e sua conversão para material sólido com uma recém adquirida capacidade de medir resistência. O termo “endurecimento” significa o desenvolvimento de dureza e resistência que segue a cura da pasta (ODLER, 2003).

O tempo e a temperatura para a cura do cimento dependem de sua composição. Por sua vez, cada fabricante de cimento possui sua própria fórmula. Contudo, pode-se considerar que uma boa temperatura de cura varia entre 40 °C e 80 °C e é alcançada entre 6 e 8 horas (SIMATUPANG *et al.*, 1991).

2.3.4 Compatibilidade entre o cimento e a madeira

A compatibilidade do cimento com a madeira pode ser expressa em termos de calor de hidratação, e assim pode-se utilizar o método do calorímetro para determinar a hidratação do cimento.

2.3.5 Incompatibilidade entre o cimento e a madeira

O emprego de material vegetal em uma matriz de cimento também apresenta efeitos deletérios sobre o aglomerante, pois é possível haver o retardamento ou até o impedimento total do processo de pega do cimento, em virtude da natureza ácida e dos açúcares dos extrativos da madeira (MACÊDO *et al.*, 2011). Para Frybort *et al.* (2008), durante a pega, os grãos de cimento ainda não hidratados são circundados por hidratos aciculares. Assim, na presença de ácidos de açúcar, açúcares e lignosulfonatos, hidratos impermeáveis são formados em torno dos grãos de cimento não hidratados, que inibem ou retardam a pega do cimento. É possível amenizar ou combater este efeito através do uso de aditivos aceleradores de pega, ou mesmo combinando-se a escolha de espécie vegetal com lenta liberação de extrativos na presença de água com o uso simultâneo de agregados minerais (FRYBORT *et al.*, 2008).

Em relação a instabilidade dimensional, particularmente à retração em espécies de baixa densidade, em misturas contendo somente as fibras vegetais e cimento Portland, este efeito é potencializado. Entretanto, ao se combinar na mistura agregado miúdo de origem mineral (areia), este efeito é parcialmente reduzido (GASSAN, 2002).

2.3.6 Efeito do tipo de cimento em compósitos madeira-cimento

O tipo de cimento usado na produção de CMCs pode afetar as propriedades físico-mecânicas finais do compósito e sua viabilidade econômica de produção, uma vez que geralmente os compósitos são formados com maiores proporções de cimento do que de madeira.

Na produção do CMC é desejável a rápida solidificação da pasta de cimento. Por esse motivo, cimentos que liberam maiores quantidades de calor, bem como aqueles que proporcionam alta resistência nos primeiros dias, seriam os recomendáveis (SOUZA, 2006). Uma vez que a composição do cimento pode variar entre fabricantes, a simples seleção de uma categoria de cimento Portland não é garantia de resultados homogêneos.

Diversos pesquisadores avaliaram a aplicação de tipos de cimentos na produção de CMCs, e, de um modo geral, concluíram que o uso de cimento de pega rápida é o mais recomendado para a fabricação do compósito (Tabela 4).

Tabela 4 - Pesquisas a respeito de CMCs com cimento Portland

(continua)

Autor(es)	Espécie Madeira	Cimento	Resultado
Moslemi <i>et al.</i> (1987)	Pinheiro (<i>Pinus contorta</i>)	CP I CP III	Verificou-se que uma relação cimento/madeira de 2,0 demonstra uma resistência à flexão ideal. O MOE, entretanto, aumentou linearmente com maiores proporções cimento/madeira. Não foram observadas diferenças significativas entre os tipos de cimento.
Beraldo e Carvalho (2004)	<i>Eucalyptus grandis</i>	CP II-E 32 CP V-ARI	O CP V-ARI apresentou melhor desempenho e maior resistência à compressão axial.
Mori <i>et al.</i> (2007)	<i>Eucalyptus grandis</i>	CP V-ARI PLUS	A madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> apresentou aptidão moderada ao cimento, as cascas tratadas, alta aptidão e as cascas não-tratadas, aptidão extremamente baixa. Verificou-se a influência positiva do tratamento químico nas cascas, possibilitando futuramente sua incorporação na manufatura de WCP.
Matoski <i>et al.</i> (2007)	<i>Pinus</i> spp.	CP V-ARI	Nos ensaios de ligação interna, para o teor de 25% de farinha, verificaram-se os melhores resultados para a farinha mais

grossa, mostrando assim a influência da distribuição granulométrica nessa propriedade.

Tabela 4 - Pesquisas a respeito de CMCs com cimento Portland

(conclusão)

Autor(es)	Espécie Madeira	Cimento	Resultado
Dos Santos <i>et al.</i> (2008)	<i>Eucalyptus</i> spp. Resíduos da madeira de candeia (<i>Eremanthus erythropappus</i>)	CP V ARI	Maiores valores significativos do MOE estático foram observados nos painéis confeccionados na associação de 25% de eucalipto ao resíduo da madeira de candeia.
Macêdo <i>et al.</i> (2011)	<i>Angelim Pedra</i> (<i>Hymenolobium Petraeum Ducke</i>)	CP I CP II-Z	Os traços de composição mais desfavorável, com CP II, 5% de madeira e/ou menor consumo de cimento, apresentaram maiores valores de dispersão provavelmente pela maior dificuldade de moldagem.
Macêdo <i>et al.</i> (2012)	PA (<i>angelim</i>), PA (<i>cedro, jatobá e tauari</i>) e PA (<i>anani e quaruba</i>).	CP V-ARI PLUS	O aumento da concentração de cloreto de cálcio de 3% para 5% melhora a compatibilidade do resíduo com a matriz cimentícia.
Sá <i>et al.</i> (2012)	<i>Toona ciliata</i> M. Roem var. <i>australis</i> <i>Pinus taeda</i> ; Clone do híbrido de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i>	CP V-ARI PLUS	
Latorraca (2013)	Quatro espécies de <i>Eucalyptus</i>	CP II-F-32 CP II-E-32 CP III CP V-ARI	O CP V-ARI apresentou o melhor desempenho na temperatura de hidratação (~100 °C), seguido do CP II (79 °C) e o CP III (51 °C) com o menor desempenho.
Azambuja <i>et al.</i> (2014)	<i>Eucalyptus grandis</i>	CP IV-P CP V-ARI	O CP IV não curou com adição de partículas de pínus em qualquer proporção. Os valores do módulo de ruptura foram maiores com o CP IV, mas com a adição de casca de arroz diminuíram. O CP V proporcionou maior resistência de união interna em todas as proporções estudadas.

Fonte: Autor (2024)

Beraldo e Carvalho (2004), ao avaliarem o comportamento mecânico de compósito eucalipto-cimento submetido ao ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos, utilizando o CP II-E-32 e o CP V-ARI, observaram que o CP V-ARI permitiu, na maioria dos casos, a obtenção de compósitos com maior resistência à compressão axial do que os fabricados com o CP II-E-32, embora alguns resultados desse último também fossem elevados. Também houve diferenças significativas

quanto às variáveis: época de corte, uso da madeira, idade de corte e posição de amostragem (base, meio e topo), na resistência à compressão axial do compósito.

Latorraca (2000) avaliou a evolução da curva de hidratação do CMC e a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e as propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos a partir de quatro tipos de cimentos (CP II-F-32, CP II-E-32, CP- II e CP V-ARI). Concluiu que o CP V-ARI apresentou o melhor desempenho na temperatura de hidratação (~100 °C), seguido do CP II (79 °C) e do CP III (51 °C) com o menor desempenho.

Azambuja *et al.* (2014) avaliaram o desempenho das propriedades mecânicas de dois tipos de cimento (CP IV- P e CP V-ARI) na fabricação de painéis de madeira cimentada com adição de casca de arroz. Os autores encontraram valores estatisticamente diferentes para algumas das propriedades mecânicas. Painéis produzidos com CP IV-P obtiveram maiores valores de MOE, enquanto os que usaram CP V-ARI apresentaram maior resistência à tração perpendicular às fibras.

O alto desempenho do CP V-ARI é explicado pelo alto teor de C₃S e C₃A, que liberam maior quantidade de calor. Várias pesquisas (MORI *et al.*, 2007; MATOSKI *et al.*, 2007; DOS SANTOS *et al.*, 2008; CARVALHO, 2000; MACÊDO *et al.*, 2012) demonstram o melhor desempenho desse cimento de alta resistência inicial em compósitos.

Na pesquisa de Moslemi e Pfister (1987) não foi observada diferença entre a resistência à flexão estática e a estabilidade dimensional de painéis feito com CP I ou CP III e madeira de *Pinus contorta*. Os autores atribuíram a homogeneidade dos resultados à composição similar destes dois tipos de cimento. Já na pesquisa de Macêdo *et al.* (2011), foi observada uma tendência de maiores resultados de resistências em compósitos produzidos com CP I após 28 dias de idade, do que os com CP II. Com a hipótese que a composição do cimento pode variar entre fabricantes, a simples seleção de uma categoria de cimento Portland não é garantia de resultados homogêneos. Assim, Parchen *et al.* (2016) avaliaram compósitos produzidos com CP II-Z de duas marcas brasileiras diferentes e encontraram comportamentos distintos, mesmo mantendo as outras variáveis iguais.

O cimento de oxicleto de magnésio (MOC) é um outro tipo de cimento utilizado em CMCs. É um cimento não hidráulico de natureza amarelada e baixa alcalinidade exibindo muitas outras propriedades superiores ao cimento Portland.

Para Zhou e Li (2012), nos últimos anos têm sido utilizado o MOC para a fabricação de CMCs, a exemplo de painéis de fibras, isolamento térmico e aglomerado de bambu. Em sua pesquisa, Zhou e Li (2012) produziram compósitos de cimento (MOC) com serragem e/ou perlita como agregado, feitos por extrusão. As propriedades físicas e mecânicas obtiveram ótimos resultados. Para Na *et al.* (2014), este cimento pode substituir o cimento Portland nas espécies de madeira que possuem alta incompatibilidade.

2.3.7 Cimento Portland de alta resistência inicial - CPV-ARI

O CPV-ARI tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos sete dias da hidratação. Isto ocorre devido à utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir o cimento com a água, ele adquire elevadas resistências, com maior velocidade. É muito utilizado na produção industrial de artefatos, onde se exige desforma rápida, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada

De um modo geral, os pesquisadores constataram que o uso de um cimento de pega rápida é mais recomendado para a fabricação de compósitos de biomassa vegetal-cimento (ULLAH *et al.*, 2015).

2.3.8 Relação água/cimento (a/c)

Uma relação a/c adequada é a uma das principais variáveis para obter um CBWC com boas propriedades físicas e mecânicas. Além do processo de hidratação incompleto, pouca água produzirá um material rígido que não poderá ser facilmente misturado, enquanto o excesso de água diluirá os constituintes do cimento, afetando negativamente o processo de hidratação e aumentando o tempo de pega (FAN *et al.*, 2012).

Geralmente, o fator a/c está em torno de 0,4 e 0,7 (em massa) (Tabela 5), na produção de compósitos (WEBER *et al.*, 2017). Por exemplo, usando 100 kg de cimento e 50 kg de água, tem-se uma relação a/c de 0,5. Se a argamassa estiver 0,3 ficará muito difícil de trabalhar, se estiver 0,8 ficará muito fraca. Porém, não é só isso: o excesso de água aumenta a retração do compósito depois de seco, causando mais fissuras.

Alguns pesquisadores (MOSLEMI, PFISTER, 1987; RAHIM *et al.*, 1995; FAN *et al.*, 1999; MATOSKI *et al.*, 2007, ROCHA, MIRANDA, 2019) realizaram a correção ou compensação de água através da equação desenvolvida por Simatupang (1979) (Equação 1), que consiste:

$$\text{Água corrigida} = (F \text{ a/c}) * C + M * (0,30 - TU) \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

F a/c = fator água/cimento;

C = quantidade de cimento (g);

M = quantidade de madeira (g);

TU = teor de umidade de madeira (%).

No trabalho de Matoski *et al.* (2007), o teor de umidade presente na madeira foi determinado através da adaptação da NBR 7211 (ABNT, 2022). Como tem influência direta na quantidade de água adicionada na mistura, foi realizada a correção através da equação. Na pesquisa de Rocha e Miranda (2019), como as partículas se encontravam secas, foi aplicada a compensação de água proposta na Equação 1.

Silva *et al.* (2021), para definirem a relação a/c dos traços, utilizaram como balizador o ensaio de índice de consistência, conforme a NBR 16541 (ABNT, 2016a) e a NBR 13276 (ABNT, 2016b), que recomendam, no caso de falta de informação quanto à quantidade de água da mistura da argamassa, adotar a água necessária para obtenção do índice de consistência de (260 ± 5) mm. Silva *et al.* (2021), realizaram o ensaio de índice de consistência com o traço de referência, adicionando água até chegar ao valor de consistência de (260 ± 5) mm. Posteriormente, adotaram a mesma quantidade de água para todas as composições.

Para Simatupang (1979), a quantidade de água ideal para o compósito depende da relação entre madeira-cimento. Em sua pesquisa, ele considerou a relação cimento/madeira de 3,5, o valor máximo para resistência à flexão foi de 35 % de água. Na relação para 3, 2,5 ou 2, a resistência foi maior para a proporção de 45 % de água. Já na relação cimento/madeira de 1,5 necessitou de mais água e atingiu melhores resultados com 55%.

Tabela 5 - Relação a/c em pesquisas a respeito de CMCs com pinus

Autor(es)	Espécie Madeira	a/c
Silva <i>et al.</i> (2021)	<i>Pinus Elliottii e Eucalyptus Grandis</i>	0,71
Rocha e Miranda (2019).	Partículas de madeira (compensado, eucalipto e pinus), provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD).	0,50
Weber <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus</i> spp.	0,40
Villas-Bôas <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus</i> spp.	0,40
Parchen <i>et al.</i> (2016)	Partículas de madeira geradas a partir de galhos e troncos de pinus (<i>Pinus</i> spp.)	0,50
Garcez <i>et al.</i> (2016)	<i>Pinus elliottii in natura</i>	0,48

Fonte: Autor (2024)

2.3.9 Tempo de cura

O tempo de cura pode ser uma desvantagem em um processo de produção do ponto de vista logístico e de custo de armazenamento dos CMCs. Isto porque as partículas de madeira podem vir a retardar a cura do cimento, e este período pode ser ainda mais longo. Normalmente, os compósitos produzidos com cimentos Portland irão atingir sua resistência máxima em 28 dias. Com exceção do CP V -ARI, que pode atingir sua cura em sete dias (CASTRO, 2021).

Moslemi e Pfister (1987), ao estudarem a influência da relação cimento/madeira e do tipo de cimento na resistência à flexão e na estabilidade dimensional de WCP, descobriram que o efeito da cura do CMC é variável entre as propriedades mecânicas requisitadas. Em seus resultados, o MOE do compósito realmente depende do período de 28 dias. Porém, o módulo de ruptura (MOR) e a estabilidade dimensional já apresentaram valores máximos dentro dos primeiros 14 dias.

Blankenhorn *et al.* (1994), ao analisarem a resistência à compressão de CMCs produzidos com cinco tipos de madeiras (*Quercus rubra*, *Acer sacharum*, *Populus tremuloides*, *Acer rubrum* e *Pinus taeda*) para o tempo de cura de sete, 14, 28 e 56 dias, encontraram que ela aumentou de acordo com o maior tempo de cura para todos os casos.

2.4 Agregados

2.4.1 Madeira *Pinus* spp.

O gênero *Pinus* é composto de mais de uma centena de espécies nativas de regiões temperadas e tropicais do mundo (USDA FOREST SERVICE, 2002). Pínus é o nome latino clássico dessas madeiras, que podem ser separadas microscopicamente nos grupos branco, amarelo e vermelho (USDA, 2008).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI), o setor florestal do Brasil se manteve estável em 2022, com cerca de 9,5 milhões de hectares de florestas plantadas em todo o país. São aproximadamente 7,4 milhões de hectares de eucalipto, enquanto 1,7 milhão de hectares de pínus e 0,38 milhões hectares de outras espécies. Esses números reforçam a importância das florestas plantadas para a preservação das florestas nativas no país, especialmente em relação ao sequestro e mercado de CO₂, tendência para o setor. O Brasil é o maior exportador mundial de resina de pínus, colocando no mercado externo 70 % da sua produção anual de 200 mil toneladas. O Paraná é o terceiro maior estado produtor (12 mil t), sendo superado apenas por São Paulo (110 mil t) e pelo Rio Grande do Sul (45 mil t) (EMBRAPA, 2021).

Em 2021, a área total de árvores plantadas totalizou 9,93 milhões de hectares, um crescimento de 1,9 % em relação ao dado revisado de 2020 (9,75 milhões de hectares). Cerca de 88,9 % dos plantios de pínus se concentram na região Sul, sendo o Paraná e Santa Catarina os principais estados produtores. Entre a produção de outras espécies, São Paulo se destaca na produção de seringueira, Pará se destaca com plantação de teca e Rio Grande do Sul com acácia (IBÁ, 2022).

As plantações comerciais de *Pinus* spp. vêm sendo feitas nas regiões Sul e Sudeste há mais de trinta anos, utilizando-se *Pinus taeda* para a produção de matéria-prima para as indústrias de celulose e papel e *Pinus elliottii* para madeira serrada e extração de resina (MEDRADO, 2005)

As espécies mais cultivadas no Brasil são o *Pinus Taeda* e o *Pinus Elliotti*. Conforme sua classificação científica, são pertencentes ao Reino Plantae, Divisão Pinophyta, Classe Pinopsida, Ordem Pinales, Família Pinaceae, Gênero *Pinus* e Espécies *Taeda* e *Elliotti* (OLIVEIRA, 2020). O gênero *Pinus* spp., uma espécie arbórea exótica, foi introduzida no Brasil na década de 30, como alternativa às

restrições para a utilização de outras espécies nativas do país (MENGUE, MARTINS, 2023). A abreviação spp. após o gênero indica que se refere a uma espécie já identificada e classificada. Para Castro (2015), as espécies de *Pinus* spp. possuem baixa inibição quando em contato com o cimento. Apesar de diminuir os limites de resistência mecânica, a presença da madeira no concreto reduz a massa específica, apresentando, consequentemente, um material mais leve e de mais fácil manuseio (GARCEZ *et al.*, 2016).

A madeira de *Pinus* spp. possui massa específica aparente entre 400 e 520 kg/m³, com uma umidade de 15 %. A indústria da construção civil utiliza o pínus como material definitivo e provisório no elenco de insumos próprios para a construção. O gênero é utilizado como madeira serrada para elementos estruturais, madeira beneficiada para acabamentos e peças para vedação como forros, portas e caixilhos, para situações temporárias como construção de alojamentos e instalações auxiliares e ainda, como peças estruturais nervuradas para reforço em painéis de forma para concreto (IPT, 1998; PARCHEN, 2012).

2.4.2 Compósitos com Madeira *Pinus* spp.

Para Iwakiri *et al.* (2005), as espécies de pínus, por apresentarem madeira com baixa densidade, são melhores para produção de CMCs do que as espécies folhosas, principalmente em relação aos esforços mecânicos de flexão estática e de tração perpendicular ao plano dos painéis, quando transformada em chapas de partículas aglomeradas com resinas. Segundo Castro (2015), esta madeira é considerada uma espécie de baixa inibição. Trabalhos como os de Lima (2009) e Matoski (2005) comprovam este fato ao apresentarem bons resultados de ensaios de compatibilidade dessa espécie com o cimento. Além disso, várias outras pesquisas foram feitas utilizando a madeira de pínus, e obtiveram resultados aceitáveis (Tabela 6).

Tabela 6 - Pesquisas a respeito de CMCs com pinus

Autor(es)	Espécie da madeira	Cimento	Resultados
Weber <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus</i> spp.	CP II-Z-32	Os compósitos com teor de 10% e de 20% de madeira são os mais indicados para uso. Este fato é validado pelos resultados das propriedades físicas e mecânicas das duas composições, que apresentaram resultados superiores aos demais traços
Villas-Bôas <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus</i> spp.	CP II-Z-32	A resistência à compressão no grupo em que os tratamentos possuíam Ca(OH)_2 na relação água/cal igual a 6,25 foi estatisticamente superior à dos outros dois grupos. A escolha da relação água/cal para o tratamento das partículas deve ser correlacionada com a sua granulometria.
Parchen <i>et al.</i> (2016)	Partículas de madeira geradas a partir de galhos e troncos de <i>pinus</i> (<i>Pinus</i> spp.)	CP II-Z (duas marcas diferentes)	Ambas as marcas de cimento Portland proporcionaram aglutinação adequada das partículas de madeira pré-tratadas, porém, comportamentos distintos em outros testes.
Garcez <i>et al.</i> (2016)	<i>Pinus elliottii</i> in natura	CP IV-32	As massas específicas dos compósitos diminuíram com o aumento do percentual de serragem inserido. Quanto maior o percentual de serragem inserido no compósito, maior o teor de umidade medido, independentemente do tipo de tratamento aplicado na serragem.
Erakhrumen <i>et al.</i> (2008)	Serragem de <i>Pinus Caribaea</i>	CP	Os valores médios obtidos para todas as propriedades investigadas foram comparativamente altos quando considerados aqueles para materiais compósitos lignocelulósicos reforçados com cimentos semelhantes na literatura. A resistência à água, as propriedades de resistência e, como esperado, a densidade foram maiores nas placas com altas inclusões de cimento nas diversas proporções de mistura.
Moslemi <i>et al.</i> (1987)	Pinheiro (<i>Pinus contorta</i>)	CP I CP III	As massas específicas dos compósitos diminuíram com o aumento do percentual de serragem inserido. Quanto maior o percentual de serragem inserido no compósito, maior o teor de umidade medido, independentemente do tipo de tratamento aplicado na serragem.

Fonte: Autor (2024)

2.4.3 Caracterização física da madeira

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação da porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas

representa na massa total ensaiada. Essa composição granulométrica tem uma grande influência nas propriedades futuras das argamassas e concretos confeccionados com esse agregado. Através dos resultados obtidos do ensaio é possível a construção da curva de distribuição granulométrica.

No Brasil, a composição granulométrica de agregados é determinada por meio de ensaios seguindo os métodos prescritos nas normas NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2022). O processo de peneiramento é realizado através de peneiras com malhas de forma quadrada e uma sequência tal que o lado de cada abertura tenha sempre o dobro do lado da abertura da malha da peneira anterior, começando pela peneira 0,15 mm. Estas são denominadas peneiras da série normal. Também existem outras peneiras com aberturas diferentes das da série normal, utilizadas para a caracterização de dimensões características máximas e mínimas das partículas, começando pela peneira de 6,3 mm. Estas constituem a série intermediária.

A composição granulométrica de um agregado pode ser expressa pelo material que passa ou pelo que fica retido, por peneira ou acumulado. Dos ensaios de peneiramento, determinam-se os seguintes parâmetros:

- Dimensão Máxima Característica: Corresponde à abertura de malha, em mm, da peneira da série normal ou intermediária, a qual corresponde uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.
- Dimensão Mínima Característica: Corresponde à abertura de malha, em mm, da peneira da série normal ou intermediária, a qual corresponde uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente superior a 95% em massa.
- Módulo de Finura (MF): É o valor da soma das porcentagens acumuladas na série normal de peneiras dividido por 100,

A massa específica mede a razão entre a massa e o volume de material e é estabelecida pela NBR 16605 (ABNT, 2017), que especifica diretrizes para massa específica de cimento Portland e materiais em pó. A fórmula para o cálculo é expressa na Equação 2:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

ρ = massa específica do material ensaiado (g/cm^3);

m = massa do material ensaiado (g);

V = volume do material ensaiado (cm^3).

2.4.4 Relação madeira/cimento

A relação madeira/cimento é uma das variáveis importantes no processo de fabricação e tende a ter uma influência predominante nas propriedades finais dos compósitos, incluindo as propriedades mecânicas e estabilidade dimensional (NASSER *et al.*, 2016). Além disso, o custo de produção dos compósitos é diretamente correlacionado com a relação madeira/cimento usada na mistura, pois, quanto maior a quantidade de cimento, mais pesados são os compósitos, o que resulta no aumento do custo de transporte e manuseio (CASTRO, 2021; MOSLEMI, PFISTER, 1987).

Comercialmente, os compósitos madeira-cimento incorporam 2,75 a 3,0 partes de cimento para uma parte de madeira, com base no peso seco da madeira (NCL INDUSTRIES, 2023). Segundo Moslemi e Pfister (1987), em seu estudo de fabricação de WCP utilizando os tipos de cimento CP I e CP III em proporções cimento/madeira de 3,0, 2,5, 2,0 e 1,5 (em peso), concluíram que resistência à flexão dos painéis compósitos madeira-cimento melhorou significativamente ao diminuir a relação cimento/madeira de 3,0 para 2,0.

No trabalho, o traço utilizado foi de 3:1:0,5 (cimento, madeira e água, ou seja, 1:0,333:0,5 em massa). Essa relação também foi usada por Moslemi e Pfister (1987), Geimer, Souza e Moslemi (1996), Wolfe e Gjinolli (1997), Latorraca, (2000), Batista e Mascia (2001), Batista (2002) e Beraldo *et al.* (2002).

Outro fato é que as características de rigidez também dependem mais da relação cimento/madeira do que do tipo de cimento. Essa relação baseia-se no fato de o cimento ser inerentemente um material mais rígido que a madeira. Portanto, maiores proporções cimento/madeira resultam em valores mais elevados de MOE (MOSLEMI, PFISTER, 1987). Segundo Simatupang (1979), quanto maior a quantidade de cimento envolvida no processo de fabricação, melhor será a resistência mecânica do compósito, pois existe uma correlação linear entre a razão cimento/madeira e a resistência à flexão.

2.4.5 Relação cimento/areia/madeira

A relação cimento/areia/madeira é uma das variáveis importantes no processo de fabricação de compósitos para fins de blocos de vedação. Alguns estudos de CMC basearam-se na NBR 7215 (ABNT, 2019a) para a definição da proporção entre aglomerante e agregado. Essa norma estabelece um traço de 1:3 (cimento:areia), em massa, que quando convertido para volume, corresponde a aproximadamente 30% de aglomerante e 70% de agregados.

Ribeiro e Vasconcelos (2017), ao avaliarem o desempenho mecânico de CMCs produzidos com resíduos da indústria madeireira, utilizaram a relação cimento-areia em 1:3 recomendada pela NBR 7215 (ABNT, 2019a) e substituíram o agregado miúdo (areia) em frações percentuais, relativas à sua massa, em 2,5%, 5,0% e 7,5%. A matriz de cimento Portland pozolânico CP IV-32 (NBR 5736, ABNT, 1999), foi melhorada substituindo-se parcialmente o cimento por metacaulinita (10%) e hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 (5%), com fator a/c de 0,40 (Tabela 7).

Tabela 7 - Traços para a produção dos compósitos (cimento/areia/madeira)

Traço	Teor	Descrição	Consumo de cimento (kg/m^3)
	[cimento:metacaulinita:cal]: [areia:resíduo]		
T1	[1:0:0]:[3:0]	Referência 1	534,13
T2	[0,85:0,1:0,05]:[2,925:0,075]	2,5% resíduo	504,95
T3	[0,85:0,1:0,05]:[2,850:0,150]	5,0% resíduo	485,53
T4	[0,85:0,1:0,05]:[2,775:0,225]	7,5% resíduo	463,35
T5	[0,85:0,1:0,05]:[3:0]	Referência 2	531,40

Fonte: Ribeiro e Vasconcelos (2017)

Para os traços com maiores teores de resíduos de madeira, houve a redução da resistência à compressão. O traço T2, com 2,5% de resíduo, apresentou os melhores resultados, com índices de $14,51 \pm 2,3$ MPa para os esforços de compressão, $2,18 \pm 0,52$ MPa (MOR) e $8,37 \pm 1,6$ GPa (MOE) para os esforços de tração por flexão a quatro pontos, mostrando-se adequado para aplicações de revestimento interno e proteção térmica e acústica (RIBEIRO, VASCONCELOS, 2017).

Garcez *et al.* (2016), também utilizaram o traço 1:3 (cimento: e areia normalizada), em massa, com relação a/c de 0,48 recomendada pela NBR 7215

(ABNT, 2019a), substituindo 10% a 20% da massa de areia pelo mesmo volume de serragem de *Pinus elliottii*. Em seus resultados, destacaram que quanto maior o percentual de serragem inserido no compósito, maior o teor de umidade medido, independentemente do tipo de tratamento aplicado na serragem. A utilização de serragem de *Pinus elliottii in natura* como substituição parcial do agregado miúdo para a produção de compósitos cimentícios do tipo argamassa é viável do ponto de vista das propriedades físicas, não sendo necessário nenhum tipo de tratamento prévio para os teores de substituição estudados. Outra indicação para este tipo de compósito seria para a fabricação de artefatos de cimento, blocos para alvenaria ou até mesmo a confecção de placas para montagem de tapumes de obra, que necessariamente não precisam ser executados com compósitos de resistência elevada e se beneficiam da reduzida massa específica, principalmente quanto ao transporte, manuseio e montagem das peças.

Macêdo *et al.* (2011), ao avaliarem o comportamento mecânico à compressão (resistência à compressão aos 28 dias) do CMC, utilizaram os traços 1:1, 1:2, e 1:3, (em massa, cimento: areia) com 5%, 3,5% e 2% de adição de madeira (em massa, em substituição a igual massa de areia), todos moldados com e sem aditivo acelerador de pega (cloreto de cálcio), e, em dois tipos de cimento: CP I e CP II-Z. Sendo o traço 1:3 o que apresentou melhor desempenho.

Silva *et al.* (2021), ao substituírem o agregado miúdo por resíduo de madeira em argamassa e analisarem as características físicas e propriedade mecânicas do compósito, utilizaram o traço referência 1:5 (cimento: areia), em massa, fundamentado nos trabalhos de Gupta e Kua (2018), Gil, Ortega e Pèrez (2017), Corinaldesi *et al.* (2016) e Aciu e Cobîrzan (2013), tendo em vista que todos estes autores pesquisaram a inserção de resíduos de madeira em argamassas, com o mesmo traço referência. O percentual de substituição do agregado miúdo por resíduo de madeira foi definido utilizando três valores diferentes de substituição, 2,5, 5,0 e 10,0% em relação ao volume do agregado miúdo.

2.4.6 Caracterização física da areia

O agregado miúdo de origem mineral (areia) são grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura

de malha de 150 μm , em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com peneiras definidas pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010).

Alguns autores, como Mehta e Monteiro (2014), recomendam a utilização de agregados minerais para diminuir o retardamento e melhorar o processo de pega do cimento, especialmente em relação à instabilidade dimensional, como a retração. Para Gassan (2001), espécies de baixa densidade em misturas contendo somente as fibras vegetais e cimento Portland, a instabilidade dimensional, particularmente a retração, é potencializada. Entretanto, ao combinar agregado miúdo na mistura, este efeito é parcialmente pugnado.

Para inserção da areia no compósito, normalmente é feita sua caracterização de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022) e NBR 7217 (ABNT, 1987), para determinar a granulometria da areia e o MF.

A granulometria é determinada segundo a NBR 7217 (ABNT, 1987), atendendo aos limites de apenas uma das zonas da Tabela 8. A norma estabelece que poderão ser usadas areias com distribuição granulométrica diferente, desde que sejam feitos ajustes baseados em estudos prévios de dosagem.

Tabela 8 - Limites granulométricos do agregado miúdo				
Peneiras com abertura em mm NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010)	Porcentagem em massa retida acumulada na peneira para as diferentes zonas			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
600	15	35	55	70
300	50	65	85	95
150	85	90	95	100

Nota 1: O MF da zona ótima varia de 2,20 a 2,90

Nota 2: O MF da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

Nota 3: O MF da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2022)

O MF do agregado miúdo, cuja granulometria cumpre com qualquer uma das zonas indicadas na Tabela 8, não deve variar mais que 0,2 para materiais da mesma

origem. Pelos critérios de MF, as areias são classificadas em: areia grossa $MF > 3,9$; areia média ($3,9 > MF > 2,4$) e fina $MF < 2,4$. Segundo Macêdo *et al.* (2011), em CMCs, um baixo valor de MF na areia indica que a argamassa produzida com este agregado demandará uma relação a/c elevada devido à grande superfície específica dos grãos de areia. Assim, um aumento na relação a/c ou excesso de água resulta no aumento da retração do compósito depois de seco, causando mais fissuras.

2.5 Tratamentos e aditivos

Em compósitos biomassa vegetal-cimento, o termo compatibilidade refere-se ao grau de endurecimento do cimento após a mistura com água e biomassa. Em termos gerais, se o processo químico de endurecimento do cimento é imperturbável ou é perturbado apenas em pequena extensão pela presença da biomassa, diz-se que esse cimento e biomassa são compatíveis; por outro lado, se o endurecimento do cimento for prejudicado pela presença da biomassa, eles são considerados incompatíveis. Este fenômeno de interação é comumente expresso pela diminuição das propriedades físicas dos compósitos de madeira-cimento, resultando em amostras sem integridade física (JORGE *et al.*, 2004).

Para Frybort *et al.* (2012), o cimento possui uma influência negativa nas propriedades mecânicas e dimensionais da madeira em função da degradação química dos componentes lenhosos. Isso ocorre porque ao introduzir a madeira na pasta de cimento, as partículas são expostas à alta alcalinidade e, como resultado, decresce a estabilidade dimensional da madeira (KOLLMANN, COTÉ, 1968; ISHIKURA *et al.*, 2010). Assim, faz-se necessário o uso de técnicas que proporcionam a compatibilidade entre a madeira e o cimento. Segundo Simatupang *et al.* (1988), as principais técnicas são: maturação da madeira ou das partículas; extração de componentes inibitórios; secagem das partículas em fornos; utilização de CP V-ARI e utilização de cimento aluminoso.

Para melhorar a compatibilidade entre biomassa e cimento, vários métodos são empregados, incluindo pré-tratamento, adição de aceleradores e injeção de CO_2 , - conforme Quadro 1. A eliminação da inibição do endurecimento do cimento por esses métodos pode ser atribuída à redução da quantidade de substâncias inibidoras difundidas em pasta de cimento ou à aceleração da hidratação do cimento por força externa para neutralizar o efeito retardador da adição de biomassa (NA *et al.*, 2014; JORGE *et al.*, 2004).

Quadro 1 - Métodos para melhorar a compatibilidade entre biomassa e cimento

Pré-tratamentos da biomassa	
Imersão em Hidróxido de Sódio (NaOH) ou Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) ₂)	A hidrólise alcalina degrada as hemiceluloses e açúcares, transformando-os em substâncias não inibidoras (BERALDO, 1994). Em fibras naturais seus efeitos são: a remoção de certas quantidades de cera, lignina, óleo e outras impurezas; a decomposição de celulose, que leva à exposição de cristalitos de curta duração; e o aumento da rugosidade da superfície da fibra, melhorando propriedades mecânicas (ADENIYI <i>et al.</i> , 2019).
Imersão em Silicato de Sódio	A imersão em Na ₂ SiO ₃ pode remover parte das substâncias inibidoras da biomassa ou impedir a ação entre substâncias inibidoras e cimento, formando uma camada na superfície da biomassa (NA <i>et al.</i> , 2014).
Solubilização em água fria ou quente	A extração aquosa é um método eficaz para remover compostos deletérios solúveis antes da mistura da biomassa com cimento (NA <i>et al.</i> , 2014).
Aditivos aceleradores de pega	
Cloreto de cálcio	O cloreto de cálcio (CaCl ₂) não só altera a taxa de hidratação dos minerais do cimento como também reage com eles, influenciando as propriedades de resistência, composição química, área superficial, morfologia e porosidade dos produtos da hidratação. O seu uso é o mais divulgado, por sua ampla disponibilidade no mercado e baixo custo (CASTRO <i>et al.</i> , 2014).
Injeção de CO₂	
Outro método promissor para acelerar a fixação de cimento misturado com madeira e melhorar a compatibilidade madeira-cimento é o uso de CO ₂ gasoso ou supercrítico. CO ₂ é neutralizado pelo silicato de cálcio no cimento, resultando em carbonato de cálcio altamente insolúvel (NA <i>et al.</i> , 2014).	

Fonte: Autor (2024)

A principal causa de inibição é a presença de compostos químicos como açúcar e tanino nas partículas da biomassa. Portanto, é necessário remover esses compostos com pré-tratamento ou usar aditivos aceleradores de pega que possam compensar o efeito retardador (KARADE, 2010). O tratamento alcalino é o método mais comum usado para remover impurezas orgânicas, bem como hemicelulose e lignina (ADENIYI *et al.*, 2019; SANJAY *et al.*, 2019; NA *et al.*, 2014; JORGE *et al.*, 2004). Alguns dos aceleradores mais comuns são CaCl₂, carvão ativado, SnCl₂, FeCl₃, AlCl₃ ou MgCl₂ (VO, NAVARD, 2016; NA *et al.*, 2014).

Para Castro (2021), há basicamente duas formas de minimizar o efeito deletério da madeira na pega e cura do cimento, reduzindo o problema da incompatibilidade madeira-cimento: métodos de extração (tratamento) e aditivos aceleradores de pega.

2.5.1 Tratamentos

Tanto a quantidade quanto a composição de extrativos e açúcares presentes na madeira afetam a pega do cimento. Assim, para eliminar ou reduzir essas ameaças utiliza-se o método de extração desses componentes químicos, através de pré-tratamentos na madeira antes de utilizá-las na produção de CMCs. Para Castro (2015), a função principal dos tratamentos na madeira é promover a extração de seus materiais orgânicos, através da solubilização do material vegetal com alguma substância polar ou apolar. Os principais pré-tratamentos são: água fria, água quente e solução alcalina.

Para Jorge *et al.* (2014), o efeito inibitório que algumas madeiras exercem na hidratação do cimento geralmente está associado aos seus extrativos. A extração tem o efeito de reduzir o teor de açúcar, o que acaba por aumentar a compatibilidade. Porém, nem sempre essa correlação direta existe. Na pesquisa de Pereira *et al.* (2012), por exemplo, não foi apresentada diferença significativa entre a inibição da madeira *in natura* ou após extração com substâncias apolares, como etanol e éter etílico, para a espécie *Pinus* spp. Em relação ao comportamento a ensaios físico-mecânicos, nem sempre há melhora no compósito. Na pesquisa de Beraldo e Rolim (1996), onde avaliaram a influência da lavagem das partículas na resistência à compressão simples (aos sete dias), não foram observadas diferenças significativas na resistência à compressão quando comparados compósitos fabricados com partículas lavadas com não lavadas de *Eucalyptus citriodora*. Isso indica que cada método de extração deve ser avaliado separadamente. Ainda, a eficiência do pré-tratamento dependerá da compreensão de quais são exatamente os componentes inibidores, para que haja uma extração seletiva que não afete a estrutura da madeira.

2.5.2 Extração com água quente, fria e soluções alcalinas

A extração aquosa é um método eficaz para remover compostos deletérios solúveis antes da mistura da madeira com o cimento. A eficiência do método depende do pH da solução, da temperatura e do tempo de extração, dentre outros (CARVALHO, 2000). O tratamento com água fria consiste na imersão do material vegetal em água a uma temperatura ambiente, por um período pré-estabelecido. Porém, algumas variáveis são importantes de serem avaliadas. Por exemplo, a

constituição química e quantidade dos componentes solúveis varia de espécie para espécie, por isso nem sempre o efeito da extração com água fria é constante. Para Na *et al.* (2014), diferentes espécies de madeira contêm diferentes tipos e quantidades de extrativos de madeira, portanto, têm efeitos diferentes na hidratação do cimento, alguns impedindo completamente a pega do cimento. Na pesquisa de Alberto, Mougél e Zoulalian (2000), utilizando o mesmo pré-tratamento de imersão das partículas por 48 hora em cinco tipos de madeiras, em duas (*Pterocarpus angolensis* e *Erythrophleum suaveoleuns*) melhorou consideravelmente a compatibilidade entre o cimento e as madeiras, porém, não surtiu o efeito benéfico nas espécies *Albizia adianthifolia*, *Sterculia appendiculata* e *Khaya nyasica*. O tempo de extração também depende da espécie vegetal que será usada como matéria-prima do compósito. Na pesquisa de Aggarwal *et al.* (2008), os extrativos solúveis em água fria das fibras de *Cajanus cajan* são quase que totalmente removidos após três horas. Porém, foram necessários três dias de imersão para que os extrativos fossem removidos da madeira de *Tectona grandis* (SUTIGNO, 2002).

Segundo Na *et al.* (2014), os extrativos solúveis em água quente são apontados como um dos principais inibidores do cimento. É por esta razão que, segundo Aggarwal *et al.* (2008), a extração com água quente tende a ser mais eficiente do que a com água fria. Em diversas pesquisas (SUTIGNO, 2000; MA, WANG 2012; YE, YU, HAN 2002), o tratamento com água fria na madeira foi menos eficiente do que com água quente, e o tratamento com solução de NaOH foi mais eficaz.

Para Sutigno (2000), o tratamento com solução de NaOH é mais eficaz do que água quente e esta é mais eficaz do que com água fria. A eficácia de utilização de soluções alcalinas como hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), deve-se ao fato de que a hidrólise alcalina degrada as hemiceluloses e açúcares, transformando-os em substâncias não inibidoras (ALBERTO, MOUGEL, ZOULALIAN, 2000). Segundo Sanjay *et al.* (2019), o hidróxido de sódio (NaOH) remove do material vegetal o conteúdo amorfo, hemicelulose e lignina, o que leva a superfície da fibra a tornar-se áspera. Espera-se que essas superfícies rugosas promovam um forte elo interfacial quando as fibras e os compósitos da matriz são feitos de fibras como reforço.

No estudo de Castro *et al.* (2014), foi comparada a utilização de tratamentos com água fria, água quente, solução alcalina em cal hidratada e adição de aditivo

cloreto de cálcio. Apresentou-se, como resultado, a prescindibilidade de tratamentos na madeira, sendo mais efetiva, entre todos os tratamentos, a utilização do aditivo cloreto de cálcio. Para tratamento de *Eucalyptus dunnii* com água quente e com hidróxido de sódio foram obtidos resultados inferiores aos corpos de prova *in natura* (LATORRACA, 1996). Pereira *et al.* (2006) examinaram a hidratação do cimento com *Pinus* spp. tratados com substâncias apolares, como o etanol e éter etílico. Os resultados demonstraram que não há diferença significativa na compatibilidade da mistura quando a madeira está *in natura* ou após os métodos extrativos.

Além dos tratamentos químicos já mencionados, outras soluções podem ser feitas. De acordo com Vo e Navard (2016), para prevenir a degradação das fibras e melhorar a durabilidade dos compósitos, pode-se fazer tratamentos mistos, modificações de matriz e exposição do cimento Portland ao dióxido de carbono por injeção de CO₂. Em alguns casos, uma combinação de dois ou mais tratamentos aplicados às fibras melhora a ligação fibra-matriz. Para reduzir a alcalinidade da matriz de cimento e aumentar a durabilidade de materiais à base de biomassa, pode-se adicionar subprodutos como: cinzas volantes, sílica ativa, pedra-pomes, cinzas de casca de arroz, escória de alto forno e metacaulim ao cimento Portland. Assim, a alcalinidade dos ligantes pode ser reduzida. A exposição do cimento Portland ao dióxido de carbono por injeção de CO₂ também pode reduzir o tempo de endurecimento.

2.5.3 Aditivos

Aditivos químicos são utilizados em concretos e argamassas desde a antiguidade. Atualmente, grande parte dos concretos e argamassas utilizam aditivos. O avanço da tecnologia do concreto caminha em conjunto com as inovações tecnológicas dos aditivos. São utilizados normalmente com a finalidade de aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar o consumo de água, retardar ou acelerar o tempo de pega, reduzir a exsudação ou segregação.

Conforme NBR11768-1 (ABNT, 2019b), aditivo é definido como um produto adicionado e misturado no concreto em quantidades geralmente não superiores a 5% da massa de ligante total (cimento mais adições) contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido. Esta quantidade de 5% pode ser superior para algumas aplicações, como, por exemplo, aditivos para concreto projetado ou aditivos compensadores de retração. A

norma europeia EN 934-1 (EN, 2008) também define aditivos como materiais adicionados ao concreto durante sua mistura em quantidade não superior a 5% sobre a massa do cimento, para modificar as propriedades da mistura no estado fresco ou no estado endurecido. Já a ASTM C 125 (ASTM, 2003) o define como qualquer material, com exceção da água, agregados, cimentos ou fibras, usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura.

2.5.4 Aditivos aceleradores de pega

Aditivos químicos agem como aceleradores da cura do cimento, princípio diferente dos procedimentos de extração de substâncias inibidoras presentes na madeira. Porém, podem ser aplicados em combinação com o uso de lavagem das partículas vegetais (CASTRO, 2021; CARVALHO, 2000). Segundo Latorraca (2000), o uso de aditivos é bastante difundido na fabricação de CMCs, sendo os aditivos à base de cloreto de cálcio os mais recomendados por apresentarem melhor desempenho. As empresas que fabricam materiais à base de cimento e madeira geralmente adotam a relação madeira/cimento em torno de 1:2 (em peso) e a relação CaCl_2 /cimento em torno de 4% (CARVALHO, 2000). Segundo *Wei, Zhou e Tomita* (2000), que avaliaram 30 aditivos químicos no quesito melhoria da aceleração de pega de misturas madeira-cimento-água, recomendam que o grupo dos aditivos dos cloretos (CaCl_2 , FeCl_3 e SnCl_2), misturados em uma quantidade de 4% em relação ao peso do cimento, melhoram as propriedades mecânicas dos compósitos. A maioria dos pesquisadores utilizam o CaCl_2 na proporção de 3% (CASTRO, PARCHEN, IWAKIRI, 2019; NASSER *et al.*, 2016; MACÊDO *et al.*, 2012; FAN *et al.*, 2012; MACÊDO *et al.*, 2011, AL-MEFARREJ; 2009) a 4% (WEBER, *et al.*, 2017; SÁ *et al.*, 2012; DOS SANTOS ET AL., 2008; MATOSKI *et al.*, 2007) de em relação a massa seca do cimento. Para Mehta e Monteiro (2014), o aditivo acelerador de pega mais conhecido e amplamente utilizado em compósitos de matriz cimentícia é o cloreto de cálcio (CaCl_2).

Outros aditivos como o cloreto férrico (FeCl_3), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), cloreto de magnésio (MgCl_2) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) têm sido usados para minimizar o efeito inibitório da madeira, sendo utilizados na dosagem de 1 % a 5 % em relação à massa de cimento (MOSLEMI, GARCIA, HOFSTRAND, 1983). Na

pesquisa, foi utilizado o aditivo à base de cloreto de cálcio dosado a 3% em relação à massa de cimento.

2.6 Ensaios físico-mecânicas nos compósitos

2.6.1 Módulo de Elasticidade (MOE) Dinâmico

Os ensaios para a determinação do MOE dinâmico em amostras de argamassa são realizados segundo as diretrizes da NBR 15630 (ABNT, 2008). É uma técnica não destrutiva, que utiliza o emprego de aparelho emissor de ondas ultrassônicas, que mede diretamente o tempo de propagação das ondas, em microssegundos. O ensaio consiste em emitir no corpo de prova pulsos elétricos por um circuito eletrônico, que são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoelétrico localizado nos transdutores. A determinação do tempo de propagação das ondas ultrassônicas é realizada pela metodologia de transmissão direta, onde os pulsos ultrassônicos são transmitidos por meio de dois transdutores, um emissor, que transmite a onda, e outro receptor, que recebe a onda, na qual se realizaram duas leituras. Dessa forma, a partir da razão da distância do trecho percorrido (comprimento real do corpo de prova) e o valor médio dos tempos de percurso da onda, obtém-se a velocidade de propagação das ondas. Assim, com base na densidade aparente e velocidade de propagação, obtém-se o MOE dinâmico do corpo de prova.

Para Garcia *et al.* (2000), o MOE é definido como sendo a medida da rigidez elástica do material e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas, da composição química e da estrutura cristalográfica. Assim, quanto maior o MOE do compósito, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão sob tração ou compressão, e mais rígido será o compósito (TAVARES *et al.*, 2021).

A determinação do MOE dinâmico é importante em CMCs, pois remete ao fato de esta propriedade mecânica estar relacionada diretamente com a rigidez dos CMCs, refletindo também na sua capacidade de deformação e no controle de fissuração (CHRISTÓFORO *et al.*, 2013). Além disso, é importante observar que as medições de velocidade do pulso ultrassônico podem ser afetadas tanto pela própria heterogeneidade do CMC quanto por fatores como caminho percorrido pela onda,

teor de humidade, temperatura, forma e tamanho da amostra (GARCEZ *ET AL.*, 2016).

Em CMCs, este método não destrutivo de avaliação das propriedades de resistência depende diretamente da velocidade de propagação da onda ao longo da peça ensaiada e da densidade do material. Assim, quanto maior a velocidade, maior o MOE. Porém, a velocidade de propagação da onda também é influenciada pelo teor de madeira no compósito. Pois, quanto maior o teor de madeira, menor a densidade. Assim, de modo geral, quanto maior a densidade do compósito, maior o MOE, tendo em vista que o MOE dinâmico é uma função do quadrado da velocidade de propagação da onda e da densidade (CUNHA, MATOS, 2010).

2.6.2 Módulo de Elasticidade (MOE)

O MOE é uma medida da rigidez de um material, ou seja, sua capacidade de deformar temporariamente sob a ação de uma carga e retornar à sua forma original quando a carga é removida. Essa grandeza descreve a relação entre a tensão aplicada ao material e a deformação elástica resultante. Quando a carga gera um estresse maior do que o limite proporcional, ocorre deformação plástica ou rompimento. Geralmente a curva de carga por deformação é linear abaixo do limite proporcional. A inclinação da curva linear é o MOE (CASTRO, 2021).

Para testes de compressão e tração, esta inclinação pode ser chamada de módulo de Young para ser diferenciada do MOE do teste de flexão. O módulo de Young, também conhecido como MOE longitudinal, é uma medida específica do MOE para materiais isotrópicos, ou seja, materiais que possuem as mesmas propriedades em todas as direções. Ele representa a relação entre a tensão longitudinal aplicada a um material e a deformação elástica resultante nessa mesma direção. Ele desempenha um papel fundamental no dimensionamento de estruturas, previsão de deformações e seleção adequada de materiais.

O cálculo do MOE é realizado por meio de ensaios mecânicos, como o ensaio de tração. Nesse ensaio, um corpo de prova do material é submetido a uma carga axial gradualmente crescente até atingir o ponto de ruptura. Durante o ensaio, são medidas as variações de carga e deformação, que permitem determinar o MOE. A Equação 3 é utilizada para calcular o MOE em um ensaio de tração:

$$MOE = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

MOE = módulo de elasticidade

σ = tensão

ε = deformação

Na Equação 3, a tensão é a carga aplicada ao corpo de prova dividida pela área transversal original, e a deformação é a variação do comprimento do corpo de prova dividida pelo comprimento original.

Segundo Moslemi e Pfister (1987), em compósitos madeira-cimento, existe uma correlação linear entre valores de MOE e a relação madeira/cimento aplicada na mistura. Na tabela 9, são apresentados alguns valores de pesquisas de compósitos de diferentes espécies de pinus, relações madeira/cimento e massa específica, produzidos pelo método Bison Wood-Cement Board (1978).

Tabela 9 - Valores de MOE para painéis madeira-cimento de diversas espécies de pinus com adição de 3% de CaCl₂

Autor(es)	Espécie Madeira	M:C	ME (g/cm ³)	MOE (MPa)
Erakhrumen <i>et al.</i> (2008)	<i>P. caribaea</i>	1:2	1,79	7.813
Semple e Evans (2004)	<i>P. pinaster</i> *	1:3	1,14	4.870
Semple e Evans (2004)	<i>P. radiata</i> *	1:3	1,21	4.990
Iwakiri e Prata (2008)	<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	4.290

* uso de 2% de CaCl₂.

Legenda: M:C, relação madeira:cimento; ME, massa específica; MOE, módulo de elasticidade.

Fonte: Adaptado de Castro (2021)

Na pesquisa de Ruthes *et al.* (2022), através de cinco corpos de prova (mistura de partículas de *Pinus* spp., cimento Portland CP II E-32 e água), com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, foi feito o ensaio de compressão de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 2019a) em uma máquina universal de ensaios AMSLER, obtendo o MOE e MOR. Os corpos de prova foram ensaiados até a sua ruptura com velocidade de carregamento de 0,08 mm/s e incrementos de carga de 100 kgf, sendo as deformações medidas com relógios comparadores Mitutoyo, com 0,01 mm de precisão e medições até 5 mm. Através do ensaio de compressão

obtiveram-se os valores de carga aplicada, média das variações de comprimento, área e comprimento inicial dos corpos de prova que possibilitaram o cálculo da tensão e deformação correspondentes em todos os pontos, bem como o cálculo do MOE e MOR de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 1984).

2.6.3 Módulo de Ruptura (MOR)

O MOR indica a resistência à flexão de um corpo causado por uma carga, ou seja, é a tensão normal máxima suportada antes da ruptura. É um importante ensaio para determinar a aplicabilidade de um compósito para fins estruturais. O MOR, diferente do MOE, apresenta uma correlação diferente com a proporção de cimento-madeira. Sua correlação está na massa específica do compósito. Existe uma relação positiva entre a massa específica do compósito e as propriedades mecânicas como um todo. Quando há uma maior massa específica, existe uma maior pressão durante o processo de produção, resultando na densificação da madeira, eliminando os vãos e melhorando a conectividade entre o cimento e a madeira (Bejo; Takats; Vass, 2005). Na tabela 10, são apresentados alguns exemplos de valores médios de MOR em pesquisas de madeiras de florestas plantadas (pínus) considerando a relação madeira/cimento usada e a massa específica final do compósito investigado.

Tabela 10 - Valores de MOR para painéis madeira-cimento de diversas espécies de pínus com adição de 3% de CaCl₂

Autor(es)	Espécie Madeira	M:C	ME (g/cm ³)	MOR (MPa)
Erakhrumen <i>et al.</i> (2008)	<i>P. caribaea</i>	1:2	1,79	46,90
Semple e Evans (2004)	<i>P. pinaster</i> *	1:3	1,14	13,80
Semple e Evans (2004)	<i>P. radiata</i> *	1:3	1,21	11,90
Iwakiri e Prata (2008)	<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	9,41

* uso de 2% de CaCl₂.

Legenda: M:C, relação madeira:cimento; ME, massa específica; MOR, módulo de ruptura.

Fonte: Adaptado de Castro (2021)

2.6.4 Resistência à tração perpendicular à superfície

A ligação interna ou resistência à tração perpendicular à superfície é a resistência máxima suportada por um corpo de prova em um teste em que forças perpendiculares à sua superfície são aplicadas (Castro, 2021). Para Vital *et al.* (2014), resistência à tração perpendicular é um importante parâmetro na avaliação

da qualidade de um painel, pois está diretamente associada à adesão das partículas de madeira.

Vital *et al.* (2014), em sua pesquisa com painéis fabricados com partículas termorretificadas oriundas de embalagens de *Pinus* sp determinaram a resistência à tração perpendicular dos painéis através da NBR 14810-3 (ABNT, 2002), obtendo 0,89 MPa, valor similar ao obtido por Iwakiri *et al.* (2001) em painéis de partículas fabricados com mistura de cinco espécies de *pinus*, obtendo resistência à tração perpendicular média igual a 0,85 MPa. Latorraca (2000), trabalhando com madeira de *Eucalyptus urophylla*, encontrou valor médio para ligação interna de 6,76 kgf/cm² (0,66 MPa), considerando que WCP comerciais, com densidade média de 1,35 g/cm³, apresentam valor para ligação interna de 5,00 kgf/cm² (0,49 MPa), o que é um bom resultado. Além disso, a exigência mínima requerida pelo processo Bison Wood-Cement Board (1978) é de 4,0 kgf/cm² (0,39 MPa).

2.6.5 Resistência à tração na flexão e à compressão

A norma brasileira NBR 13279 (ABNT, 2005a) estabelece o método para determinação da tração na flexão e da resistência à compressão de argamassas no estado endurecido. O ensaio consiste, logo após a produção da argamassa, em preparar três corpos de prova prismáticos, de 40 x 40 x 160 mm, que são armazenados no laboratório em tempo de cura em condições de laboratório, com temperatura do ar de (23 ± 2) °C e umidade relativa do ar de (60 ± 5) %, por 28 dias, conforme preconiza a norma. A preparação da mistura para o ensaio deve seguir as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016a) em misturador mecânico.

Na pesquisa de Arruda Filho *et al.* (2012), avaliaram a resistência mecânica de compósitos de matrizes cimentícias com incorporação de resíduos industriais (resíduo cerâmico, etil vinil acetato - EVA) e fibras de sisal, utilizando as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005a). O ensaio analisou as propriedades mecânicas dos corpos de prova prismáticos da pasta matriz de revestimento e do novo compósito (placa de EVA + pasta matriz de revestimento), com e sem fibras, distribuídas de forma randômica e alinhadas dentro da matriz, obtendo aos 28 dias, para as resistências à compressão simples e à flexão na mistura de 1:6, valores de 2,25 e 0,32 MPa, respectivamente. A mistura utilizada atende à recomendação do RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials

and Structures), em que a resistência à compressão simples deve ser maior ou igual a 0,5 MPa aos 30 dias para concretos leves para fins de isolamento.

2.6.6 Índice de consistência

A norma brasileira NBR 13276 (ABNT, 2016b) determina o índice de consistência da argamassa em estado fresco. O ensaio é realizado na mesa de consistência, onde se aplica uma quantidade de argamassa em um molde tronco com três camadas e se aplicam a cada camada 15, 10 e cinco golpes com o soquete. Em seguida, esse molde tronco é desenformado em cima da mesa úmida de maneira leve e suscita e então é acionada a manivela da mesa 30 vezes, durante 30 segundos, de maneira uniforme, de forma que a argamassa se distribua sobre o tampo da mesa. Após realizados os golpes na mesa, com o auxílio de um paquímetro, são captadas três medidas do espalhamento gerado pela argamassa e realizada a média para se definir a consistência da argamassa (Figura 3).

Figura 3 - Ensaio de índice de consistência



**Legenda: mesa de queda (a) e índice de consistência (b).
Fonte: Autor (2024)**

2.6.7 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Para determinar a densidade de massa aparente, utiliza-se as recomendações da NBR 13280 (ABNT, 2005b), que estabelece o método de ensaio da mistura no estado endurecido em corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Para determinar a massa específica aparente dos corpos de prova utiliza-se a Equação 2. O volume dos corpos de prova é obtido através das médias das suas

dimensões obtidas com o uso de um paquímetro, sendo realizadas no mínimo duas leituras por dimensão. A massa é obtida por meio de pesagem em balança analítica.

2.6.8 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade é realizada seguindo as recomendações de procedimento de ensaio da NBR 15259 (ABNT, 2005c). O ensaio se dá através da pesagem dos corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm, confeccionados de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005a). Após 28 dias de cura, lixa-se a superfície do corpo de prova com lixa grossa e determina-se a massa inicial (m_0). A face quadrada do corpo de prova deve ser posicionada sobre suportes no recipiente de ensaio, evitando a molhagem de outras superfícies. O nível de água deve permanecer constante a (5 ± 1) mm acima da face em contato com a água. A partir da colocação dos corpos de prova, em contato com a água, determina-se a massa após 10 minutos (m_{10}) e após 90 minutos (m_{90}). Para determinar a absorção de água por capilaridade aplica-se a Equação 4:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo:

A_t = absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

M_0 = massa inicial do corpo de prova (g);

M_t = massa do corpo de prova após 10 e 90 minutos (s);

16 = área do corpo de prova (cm^2).

Para determinar o coeficiente de capilaridade aplica-se a Equação 5:

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

C = coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{-1/2}$);

M_{10} = massa do corpo de prova após 10 minutos (g);

M_{90} = massa do corpo de prova após 90 minutos (g).

No trabalho de Silva *et al.* (2021), para avaliar as características físicas de argamassa com inserção de resíduos de madeiras da espécie *Pinus Elliotti* e *Eucalyptus Grandis*, utilizando como traço referência 1:5 (cimento: areia), em massa, adotou-se um percentual de substituição de 0, 2,5, 5,0 e 10,0%. Para os ensaios de resistência à tração na flexão e absorção de água por capilaridade foram moldados três corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm para cada ensaio e mistura de traço definido, como prescrevem, respectivamente, a NBR 13279 (ABNT, 2005a) e a NBR 15259 (ABNT, 2005c). No ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade, foi medido para cada corpo de prova sua massa inicial (m_0), sua massa aos 10 min (m_{10}) e aos 90 min (m_{90}), em gramas. Em todos os traços com substituição da areia por serragem de madeira, houve uma redução na absorção de água por capilaridade aos 10 e 90 min, assim como em seu coeficiente de capilaridade.

Na pesquisa de Bouguerra *et al.* (2002), também obteve a redução dos valores de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade. Em seu trabalho, foi feito uma série de sete misturas de compósitos de madeira com diversas frações mássicas de agregados de madeira (variando de 10% a 40% em peso de argila seca + agregados de madeira) adicionadas a uma mistura argila-cimento. A redução aconteceu porque a adição de agregados macroporosos, como é o caso dos agregados de madeira, reduz a absorção capilar no interior da argamassa.

Segundo Martinho (2017), a inserção de resíduos porosos, como ocorre com a serragem ou farinha de madeira, podendo ser considerados macroporos, dadas as suas dimensões, reduz a absorção capilar das argamassas. Isso porque originam redes capilares de grandes dimensões, o que diminui o fluxo de água no interior da argamassa, minimizando as forças de sucção.

2.6.9 Resistência à compressão – Cimento Portland

A norma brasileira NBR 7215 (ABNT, 2019a) estabelece o método para determinação da resistência à compressão de cimento Portland em corpos de prova cilíndricos. O ensaio consiste na elaboração de corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura com argamassa composta de uma parte de cimento e três de areia normalizada, em massa, e com relação água/cimento de

0,48. A argamassa é preparada utilizando um misturador mecânico e compactada manualmente em um molde, por um procedimento normatizado.

Os moldes que contêm os corpos de prova devem ser conservados em atmosfera úmida para cura inicial. Em seguida, os corpos de prova são desmoldados e submetidos à cura submersa em água saturada de cal até a data de ruptura. Na data prevista, os corpos de prova são retirados do meio de conservação, capeados com mistura de enxofre, de acordo com o procedimento normalizado, e rompidos para determinação da resistência à compressão.

Lima e Iwakiri (2012) utilizaram a NBR 7215 (ABNT, 2019a) para determinar as características mecânicas do CMC aos sete e 91 dias, com o propósito de avaliar o potencial de utilização do resíduo do desdobro de toras de *Pinus* spp. e de substituições parciais do cimento Portland por cinza volante e escória de alto-forno. Para não haver influências de irregularidades nos topos dos corpos de prova e se garantir a ruptura por compressão simples, foram utilizados discos de Neoprene com dureza 60 a 70 shore, dispostos em guarnições de aço. As características mecânicas dos compósitos produzidos na pesquisa foram determinadas em máquina universal de ensaio da marca Emic, modelo DL 30000, com tomada de dados por computador.

Lima e Iwakiri (2012), utilizaram o traço apresentado por Iwakiri (2005), fixando-se uma relação madeira/cimento de 13,3:1 e uma relação água/cimento de 0,35. O teor de água da mistura foi controlado e corrigido em função do teor de umidade do resíduo de *Pinus* spp., de forma a manter sempre a madeira no ponto de saturação das fibras (PSF), adotado como 30%. Os menores valores de resistência à compressão, para todas as idades, foram obtidos para o compósito produzido com 100% de cimento Portland e com o resíduo de *Pinus* spp. *in natura*. Os maiores valores de resistência à compressão aos sete e 28 dias de idade foram obtidos para o compósito produzido com pré-tratamento do resíduo de pínus, tipo extração em água fria por 48 horas e adição 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (cloreto de cálcio bi-hidratado).

Weber *et al.* (2017) utilizaram a NBR 7215 (ABNT, 2019a) para determinar as características mecânicas do CMC aos 28 dias, com teores de adição de madeira de 10%, 20%, 25% e 33% em relação à massa de cimento, com o propósito de avaliar o potencial de utilização do resíduo do desdobro de toras de *Pinus* spp. e de substituições parciais do cimento Portland por cinza volante e escória de alto-forno.

Foram utilizados discos de Neoprene envoltos em aço para garantir que não houvesse influência na ruptura, devido a irregularidades nos topos dos corpos de prova. Para os ensaios mecânicos, foi utilizado o equipamento universal de ensaios (30 kN). Os ensaios mostraram que a resistência à compressão diminui conforme se aumenta o teor de madeira na mistura, porque o cimento é o material ligante do composto.

2.6.10 Absorção de água, índices de vazios e massa específica

A norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 2005d) estabelece o método para determinação da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura e das massas específicas de argamassas e concretos endurecidos. Para os efeitos desta norma, aplicam-se as seguintes definições:

- a. Índice de vazios (I_v): relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.
- b. Massa específica da amostra seca (ρ_s): relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra incluindo os poros permeáveis e impermeáveis.
- c. Massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}): relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis.
- d. Massa específica real (ρ_r): relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Lima e Iwakiri (2012), para determinar as características físicas dos compósitos otimizados aos 28 dias de idade, utilizaram os ensaios conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2005d) para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água. Foram utilizadas amostras de argamassa preparada e moldada de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019a).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram: cimento Portland CP V-ARI; resíduo de madeira do gênero *Pinus* spp.; agregado miúdo mineral (areia); água; e aditivo acelerador de pega, cloreto de cálcio (CaCl₂).

3.1.1 Cimento Portland CP V-ARI

O cimento utilizado foi o CP V-ARI, pois possui alta resistência inicial e possui uma característica importante que é a resistência à sulfatos. Também, pelo fato que em outros experimentos apresentados na revisão literária ofereceu boa compatibilidade com a madeira do *pínus*. A Tabela 11 mostra o comparativo das especificações mínimas da NBR 16697 (ABNT, 2018), em relação ao relatório de ensaio realizado pela ITAMBÉ (2024) em março de 2024.

Tabela 11 - Especificações CP V-ARI		
Parâmetros	NBR 16697 (ABNT, 2018)	ITAMBÉ (2024)
Tempo de Início de pega (minutos)	≥ 60	161
MgO (%)	≤ 6,5	3,72
Perda ao fogo (%)	≤ 6,5	3,65
Resíduos insolúvel (%)	≤ 3,5	0,86
SO ₃ (%)	≤ 4,5	2,81
Resistência à Compressão (MPa)		
1 dia	≥ 14	25,8
3 dias	≥ 24	38,7
7 dias	≥ 34	44,8
28 dias	-	52,4
Adições Permitidas		
Escória	0	0
Fíler Calcário	0 a 10	10
Material Pozolânico	0	0

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018) e ITAMBÉ (2024)

O cimento foi adquirido em sacos de 50 kg, conforme é vendido comercialmente, permanecendo na embalagem original até seu uso.

3.1.2 Madeira em Pó

O resíduo de madeira utilizada nesta pesquisa foi do gênero *Pinus spp.*, cuja origem foi através da transformação mecânica em escala comercial de resíduos, ou sobras de madeira, também chamado de farinha de madeira, realizado pela INBRASFAMA® (Indústria Brasileira de Farinha de Madeira), localizada na região metropolitana de Curitiba-PR.

A escolha pelo pínus, justifica-se por ser uma madeira com baixa densidade, diferente das espécies tropicais que possuem alta massa específica, que na produção de painéis, podem acarretar painéis com maior massa específica, e por sua vez levar a problemas de transporte e manuseio (IWAKIRI *et al.*, 2005; CASTRO, 2021). Na produção de cimento-madeira são melhores do que as espécies folhosas, principalmente em relação aos resultados aos esforços mecânicos de flexão estática e de tração perpendicular (IWAKIRI *et al.*, 2005; CASTRO, 2021). Também, é uma espécie de madeira considerada de baixa inibição, em comparação a espécies folhosas e tropicais, pois estas são ricas em extrativos que inibem a pega do cimento. Os trabalhos como o de Lima (2009) e Matoski (2005) comprovam este fato ao apresentaram bons resultados de ensaios de compatibilidade do gênero *Pinus spp.* com o cimento.

O material foi utilizado conforme fornecido pela empresa, e então foi realizado o ensaio de granulometria seguindo os métodos prescritos nas normas NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2022), obtendo a dimensão máxima característica e o MF. Justifica-se o uso de partículas menores de madeira (farinha de madeira), pois possuem uma melhor homogeneização do compósito, o que leva a uma maior resistência final desse material, principalmente quanto a resistência à compressão, conforme apresentado na pesquisa de Matoski (2013).

3.1.3 Água

A água utilizada foi fornecida diretamente pela rede pública de distribuição, por questões de praticidade e economia, pois a água destilada ou tratada com fins específicos onera a produção do compósito.

3.1.4 Aditivo acelerador de pega

O aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl_2) foi utilizado na pesquisa, disponível na forma líquida, com densidade de 1,20 Kg/l a 25 °C. Justifica-se a utilização em compósitos, pois minimiza o problema de incompatibilidade e acelera a hidratação do cimento. Além disso, possui ampla disponibilidade no mercado, baixo custo e resultados comprovados em diversos trabalhos a respeito de CMCs.

O aditivo foi adquirido no comércio, sendo comumente utilizado como acelerador de pega em diversas pesquisas apresentadas na revisão literária. A relação CaCl_2 /cimento adotado será de 3% de cloreto de cálcio com base no peso do cimento. A maioria das pesquisas apresentadas na revisão literária apresentaram este percentual como o melhor desempenho em CMCs.

3.2 Métodos

3.2.1 Dosagem e amostragem

Para a elaboração do traço da argamassa foi utilizado o cimento CP V-ARI, pois ofereceu boa compatibilidade com a madeira de pinus e várias pesquisas (MORI *et al.*, 2007; MATOSKI *et al.*, 2007; DOS SANTOS *et al.*, 2008; CARVALHO, 2000; MACÊDO *et al.*, 2012) demonstram o melhor desempenho desse cimento de alta resistência inicial em compósitos.

A areia como agregado miúdo justifica-se pois diminui o retardamento e melhora o processo de pega do cimento, conforme recomenda Mehta e Monteiro (2014), além de minimizar a retração em compósitos de baixa densidade, conforme resultados encontrados de Gassan (2001) em CMC de baixa densidade.

O traço referência foi de 1:3 (cimento:areia), em massa. Optou-se por esse traço de cimento e areia, fundamentado nos trabalhos de Ribeiro e Vasconcelos (2017), Garcez *et al.* (2016) e Macêdo *et al.* (2011), os quais utilizaram esse traço. Além disso, suas pesquisas se basearam-se na NBR 7215 (ABNT, 2019a) para a definição da proporção entre aglomerante e agregado, a qual estabelece um traço de 1:3 (cimento:areia), em massa, que, quando convertido para volume, corresponde a aproximadamente 30% de aglomerante e 70% de agregados.

O percentual de pó de madeira, em massa, iniciou em zero (traço referência), crescendo na fração de 5% até totalizar 20%. Justifica-se, começar em 5% de madeira, pois com valores inferiores a sua caracterização física-mecânica fica

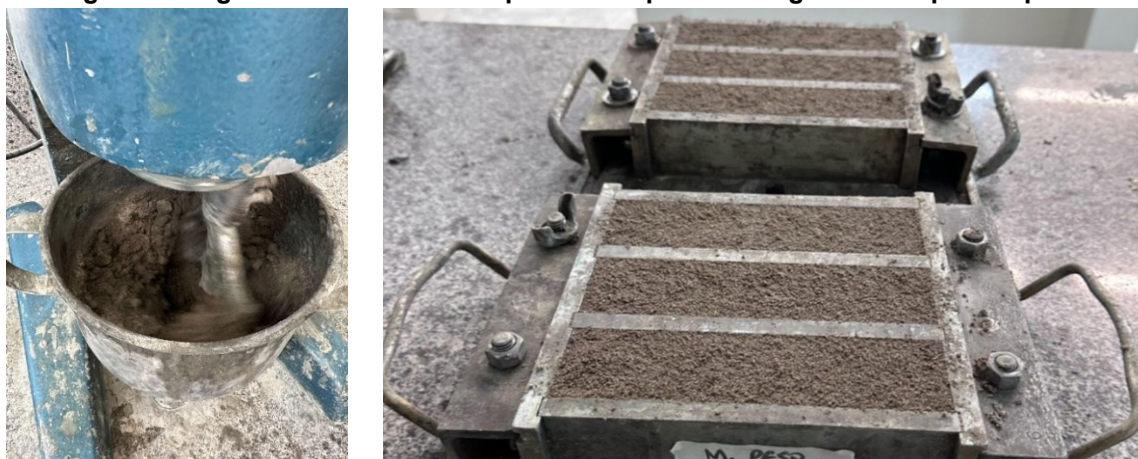
muito semelhante ao traço referência e acima de 20% diminui a resistência à compressão e aumenta o teor de umidade. Trabalhos como os de Weber *et al.* (2017) e Garcez *et al.* (2016) demonstram essa relação.

O controle de aceitação da NBR 12655 (ABNT, 2015), regulamenta dois corpos de prova da mesma amassada, para cada idade de rompimento, moldados no mesmo ato. Porém, na pesquisa para fins de análise estatística - como desvio-padrão, média aritmética e coeficiente de variação - foram produzidos seis corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm para cada traço (Figura 4), de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005a), para a execução dos ensaios de determinação densidade aparente, absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial e MOE dinâmico.

A fim de facilitar a leitura dos dados, as misturas passaram a se chamar CP0, CP5, CP10, CP15 e CP20, respectivamente, para 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de madeira por cimento sem aditivo, e CP0A, CP5A, CP10A, CP15A e CP20A, respectivamente, para 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de madeira por cimento com adição de aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl_2), vide tabela 12.

A partir da definição dos percentuais de farinha a serem utilizados, alguns testes iniciais foram realizados para a determinação da relação a/c, que foi fixada inicialmente em 0,40, conforme recomendação de Weber *et al.* (2017) e Villas-Bôas *et al.* (2017).

Figura 4 - Argamassadeira e forma prismática para moldagem de corpos de prova



Fonte: Autor (2024)

Tabela 12 - Traços da pesquisa

Número de corpos de prova	Amostra	Traço (cimento:areia)	Relação a/c	Madeira (%)	Aditivo (%)
Traço Referência 1					
6	CP0	1:3	0,40	0%	0%
6	CP5	1:3	0,40	5%	0%
6	CP10	1:3	0,40	10%	0%
6	CP15	1:3	0,40	15%	0%
6	CP20	1:3	0,40	20%	0%
Traço Referência 2					
6	CP0A	1:3	0,40	0%	3%
6	CP5A	1:3	0,40	5%	3%
6	CP10A	1:3	0,40	10%	3%
6	CP15A	1:3	0,40	15%	3%
6	CP20A	1:3	0,40	20%	3%

Legenda: Relação a/c: água/cimento

Fonte: Autor (2024)

3.2.2 Composição granulométrica e o módulo de finura: agregado miúdo

O agregado miúdo de origem mineral é proveniente de jazidas da localidade de Indaial – SC. Sua caracterização foi feita de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987), encontrando a granulometria da areia e o MF, atendendo os limites de apenas uma das zonas já apresentadas na Tabela 8. Para evitar a influência do inchamento, toda a areia utilizada no trabalho foi seca em estufa por no mínimo 24 horas (Figura 5). O ensaio de composição granulométrica do resíduo foi feito de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), na qual foram obtidos o MF e a dimensão máxima característica.

Figura 5 - Estufa e peneiras para ensaio de composição granulométrica



Fonte: Autor (2024)

3.2.3 Composição granulométrica e o módulo de finura: madeira *Pinus* spp.

O pó de madeira foi caracterizado através da NBR 7217 (ABNT, 1987), encontrando a granulometria da areia e o MF. O MF, soma das porcentagens acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normalizada, dividida por 100, é determinado de acordo com a NBR 7211 (2022). Foi realizado o ensaio de composição granulométrica do resíduo (Figura 6), de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), na qual foram obtidos o MF e a dimensão máxima característica.

Figura 6 - Ensaio de composição granulométrica



Fonte: Autor (2024)

3.2.4 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A densidade de massa aparente foi determinada utilizando as recomendações da NBR 13280 (ABNT, 2005b). Os 60 corpos de prova foram medidos utilizando um paquímetro e pesados em balança calibrada (com resolução de 0,1 g), conforme Figura 7. Para cada corpo de prova foram realizadas duas leituras por dimensão (largura, altura e comprimento), adotando a medição em dois pontos do corpo de prova, e posteriormente foi feita a média de cada medição (largura, altura e comprimento), calculando o volume a partir destas médias. A norma não exige a secagem em estufa das amostras antes dos testes de massa aparente ou capilaridade, porém, todas os corpos de prova foram colocados em estufa por 24 horas, antes da pesagem.

Figura 7 - Densidade de massa aparente: corpo de prova e medição



Fonte: Autor (2024)

A massa foi obtida por meio de pesagem em balança de cada corpo de prova. Então, a densidade aparente de cada corpo de prova foi calculada dividindo a massa pelo volume, conforme Equação 2 da seção 2.4.3. A densidade aparente média foi calculada através da média da densidade dos corpos de prova.

3.2.5 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada seguindo as recomendações de procedimento de ensaio da norma NBR 15259 (ABNT, 2005c), utilizando as mesmas aparelhagens da NBR 13279 (2005a) acrescido de: balança, cronometro, recipiente para armazenar os corpos de prova, suporte para os corpos de prova e espátula.

O ensaio foi realizado pesando os 60 corpos de prova prismáticos, 40 x 40 x 160 mm, moldados conforme a NBR 13279 (2005a), determinando a massa inicial (m_0) em gramas de cada corpo de prova. Após, posicionaram-se os corpos de prova com a face quadrada no recipiente de ensaio (Figura 8). O nível de água permaneceu constante a (5 ± 1) mm acima da face em contato com a água, determinando-se a massa de cada corpo de prova, em gramas, aos 10 minutos (m_{10}) e aos 90 minutos (m_{90}).

Figura 8 - Ensaio de absorção de água por capilaridade aos 10 minutos (m_{10}) e aos 90 minutos (m_{90})



Fonte: Autor (2024)

O cálculo de absorção de água por capilaridade foi feito através da Equação 4 da seção 2.6.8, para cada intervalo de tempo (m_{10} e m_{90}) de cada corpo de prova, e, posteriormente, calcularam-se as médias de valores para cada intervalo. O coeficiente de capilaridade foi calculado através da Equação 5 da mesma seção, para cada corpo de prova, e, posteriormente, calcularam-se as médias das diferenças de massa aos 10 e 90 minutos dos corpos de prova.

3.2.6 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio foi realizado conforme a norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 2005d), que estabelece o método para a determinação da absorção de água e do índice de vazios por imersão e fervura. Foram utilizados somente dois corpos de prova por traço (Figura 9). A partir da pesagem das massas dos corpos de prova imersos (M_i), saturados (M_{sat}) e seco (M_s) em estufa, foram calculadas a absorção de água por imersão (Equação 6), índices de vazios (Equação 7), massa específica seca (Equação 8), massa específica saturada (Equação 9), e massa específica real (Equação 10) de cada corpo de prova, bem como suas respectivas médias.

Figura 9 - Ensaio de absorção de água por imersão



Fonte: Autor (2024)

$$(M_{\text{sat}} - M_s / M_s) \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$(M_{\text{sat}} - M_s / M_{\text{sat}} - M_i) \times 100 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$M_s / M_{\text{sat}} - M_i \quad (\text{Eq. 8})$$

$$M_{\text{sat}} / M_{\text{sat}} - M_i \quad (\text{Eq. 9})$$

$$M_s / M_s - M_i \quad (\text{Eq. 10})$$

3.2.7 Resistência à tração na flexão e à compressão

A resistência à tração na flexão foi determinada conforme a norma brasileira NBR 13279 (ABNT, 2005a). A partir dos traços referência da Tabela 13, foram confeccionados seis corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm de cada traço. Os quais foram armazenados no laboratório em tempo de cura em condições de laboratório, com temperatura do ar de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60 \pm 5) \%$, durante 28 dias, conforme preconiza a norma.

A preparação da mistura para o ensaio seguiu as recomendações da norma brasileira NBR 16541 (ABNT, 2016a) em misturador mecânico. Aplicou-se uma carga sob cada corpos de prova até sua ruptura (Figura 10).

Tabela 13 - Traço pesquisa

Traço Referência 1				Traço Referência 2			
Identificação	Amostra	Madeira	Aditivo	Identificação	Amostra	Madeira	Aditivo
CP0	CP0(1)	0%	0%	CP0A	CP0(1)	0%	3%
	CP0(2)	0%	0%		CP0(2)	0%	3%
	CP0(3)	0%	0%		CP0(3)	0%	3%
	CP0(4)	0%	0%		CP0(4)	0%	3%
	CP0(5)	0%	0%		CP0(5)	0%	3%
	CP0(6)	0%	0%		CP0(6)	0%	3%
CP5	CP5(1)	5%	0%	CP5A	CP5A(1)	5%	3%
	CP5(2)	5%	0%		CP5A(2)	5%	3%
	CP5(3)	5%	0%		CP5A(3)	5%	3%
	CP5(4)	5%	0%		CP5A(4)	5%	3%
	CP5(5)	5%	0%		CP5A(5)	5%	3%
	CP5(6)	5%	0%		CP5A(6)	5%	3%
CP10	CP10(1)	10%	0%	CP10A	CP10A(1)	10%	3%
	CP10(2)	10%	0%		CP10A(2)	10%	3%
	CP10(3)	10%	0%		CP10A(3)	10%	3%
	CP10(4)	10%	0%		CP10A(4)	10%	3%
	CP10(5)	10%	0%		CP10A(5)	10%	3%
	CP10(6)	10%	0%		CP10A(6)	10%	3%
CP15	CP15(1)	15%	0%	CP15A	CP15A(1)	15%	3%
	CP15(2)	15%	0%		CP15A(2)	15%	3%
	CP15(3)	15%	0%		CP15A(3)	15%	3%
	CP15(4)	15%	0%		CP15A(4)	15%	3%
	CP15(5)	15%	0%		CP15A(5)	15%	3%
	CP15(6)	15%	0%		CP15A(6)	15%	3%
CP20	CP20(1)	20%	0%	CP20A	CP20A(1)	20%	3%
	CP20(2)	20%	0%		CP20A(2)	20%	3%
	CP20(3)	20%	0%		CP20A(3)	20%	3%
	CP20(4)	20%	0%		CP20A(4)	20%	3%
	CP20(5)	20%	0%		CP20A(5)	20%	3%
	CP20(6)	20%	0%		CP20A(6)	20%	3%

Fonte: Autor (2024)

A resistência à tração na flexão foi calculada segundo a Equação 11:

$$R_f = 1,5 F_f \cdot L / 40^3 \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

R_f = resistência à tração, em megapascals;

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L = distância entre os suportes, em milímetros;

Figura 10 - Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autor (2024)

Após encontrada a resistência à tração na flexão de cada corpo de prova, aplicou-se a média entres os corpos de prova e o desvio padrão para o cálculo da variação ou dispersão dos valores de resistência à tração na flexão de cada corpo de prova.

Para a determinação da resistência à compressão axial, utilizou-se as metades dos corpos de provas do ensaio de flexão, posicionados no dispositivo de apoio (dispositivo de Rilem multifuncional argamassa) do equipamento de ensaio (figura 11). De modo que a face arrasada não ficou em contato com os dispositivos de apoio e com o dispositivo de carga. Foi aplicado uma carga inicial (50 ± 10) N/s até ruptura do corpo de prova (Figura 11). Para o cálculo da resistência à compressão axial em megapascal, aplicou-se a Equação 12:

$$R_c = F_c / 1600 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

R_c = resistência à compressão, em megapascal;

F_c = carga máxima aplicada, em newtons;

1600 = área da seção considerando quadrada do dispositivo de carga 40 x 40 mm, em milímetros quadrado.

Após determinada a resistência à compressão axial de cada corpo de prova, aplicou-se a média entres os corpos de prova e o desvio padrão para o cálculo da variação ou dispersão dos valores de resistência à compressão axial de cada corpo de prova.

Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autor (2024)

3.2.8 Módulo de elasticidade (MOE) dinâmico

Para Garcez (2016), a determinação do MOE em compósito é de suma importância, pois remete ao fato de que esta propriedade mecânica está relacionada diretamente com a rigidez dos CMCs, refletindo também na sua capacidade de deformação e no controle de fissuração.

Os ensaios para a determinação do MOE dinâmico foram realizados segundo as diretrizes da NBR 15630 (ABNT, 2008). O ensaio foi feito por emissão de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica, usando o aparelho da marca Proceq modelo Pundit PL-200 UPV, com transdutores de 54 kHz e forma direta de leitura (Figura 12).

Figura 12 - Ensaios para a determinação do MOE dinâmico



Fonte: Autor (2024)

Para o ensaio foram utilizados seis corpos de prova por traço, pois a norma recomenda mínimo três por ensaio. Os corpos de prova cujas faces não estavam suficientemente lisas e planas, foram regularizadas através de lixamento, a fim de

possibilitar o acoplamento com os transdutores. A densidade de massa aparente foi determinada utilizando as recomendações da NBR 13280 (ABNT, 2005b). Para cada corpo de prova foram realizadas duas leituras por dimensão (largura, altura e comprimento), adotando a medição em dois pontos do corpo de prova, e posteriormente feito a média de cada medição (largura, altura e comprimento), calculando o volume a partir destas médias. O volume dos corpos de prova foi obtido através das médias das suas dimensões. A massa foi obtida por meio de pesagem em balança de cada corpo de prova. A densidade aparente de cada corpo de prova foi então calculada dividindo a massa pelo volume.

Para cada corpo de prova foram feitas três leituras de tempo, a partir destas leituras foi calculada a velocidade de propagação através da Equação 13 para as três leituras. Assim, utilizando a menor velocidade, foi calculado o MOE pela Equação 14.

$$V = L / t \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

V = velocidade de propagação de ondas ultrassônica, em mm/μs;

L = comprimento do corpo de prova, em mm;

T = tempo registrado no mostrador digital, em μs.

$$Ed = \frac{v^2 \rho (1+\mu) (1-2\mu)}{1-\mu} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

Ed: MOE dinâmico, em megapascal;

v: velocidade de propagação da onda ultrassônica, em mm/μs;

ρ: densidade aparente, em kg/m³;

μ: coeficiente de Poisson. Adota-se o valor de 0,2 nesta equação.

Após calcular o MOE dinâmico de cada corpo de prova, foi realizado a média de velocidade e do MOE dos seis corpos de prova de cada traço, transcrevendo para os resultados apenas a velocidade média de propagação da onda e o módulo

médio de elasticidade dinâmico de cada traço (CP0, CP5, CP10, CP15, CP20, CP0A, CP5A, CP10A, CP15A e CP20A).

3.2.9 Módulo de Elasticidade (MOE) estático

O cálculo do MOE estático foi realizado por meio do ensaio de tração na flexão da NBR 13279 (ABNT, 2005a). Os corpos de provas foram submetidos a uma carga axial gradualmente crescente até atingir o ponto de ruptura. Durante o ensaio, foram medidas as variações de carga e deformação, que permitiram determinar o MOE estático.

Através da Equação 3 citada na seção 2.6.2, foi calculado o MOE do compósito. Justifica-se, calcular o MOE estático para os compósitos, pois existe uma correlação linear entre valores de MOE e a relação madeira/cimento aplicada na mistura. As pesquisas de Erakhrumen *et al.* (2008), Semple e Evans (2004) e Iwakiri e Prata (2008), demonstraram que quanto maior a relação madeira/cimento menor o MOE estático, em MPa. Adotou-se como aceitável o MOE acima de 4,0 MPa, conforme pesquisas já apresentadas na revisão literária. Sendo que WCPs comerciais produzidos no processo Bison Wood-Cement Board (1978) pela indústria internacional, apresentam valores de MOE em torno de 30.000 kgf/cm² (2,94 MPa).

3.2.10 Módulo de Ruptura (MOR)

O MOR foi determinado por meio do ensaio de tração na flexão da NBR 13279 (ABNT, 2005a), em que as amostras foram submetidas a uma carga crescente até a ruptura. A partir da carga máxima aplicada, calculou-se o MOR através da Equação 15:

$$MOR = 3FL / 2bd^2 \quad (Eq. 15)$$

Onde:

F = carga máxima aplicada (N);

L = comprimento entre os suportes (mm);

b = largura da amostra (mm);

d = espessura da amostra (mm).

Justifica-se o cálculo do MOR, pois existe uma correlação da massa específica do compósito com as propriedades mecânicas do compósito. Quanto menor a relação madeira/cimento, maior a densidade/massa específica do compósito e concomitantemente maior o MOR, em MPa. Isto porque quanto maior a massa específica, alcançada por uma maior pressão durante o processo de produção, maior a densificação da madeira, eliminação de vãos e melhor a conectividade entre o cimento e a madeira. As pesquisas de Erakhrumen *et al.* (2008), Semple e Evans (2004) e Iwakiri e Prata (2008), demonstraram que quanto menor a relação madeira/cimento maior o MOR em MPa. Adotou-se como aceitável valor de MOR acima de 10,0 MPa, conforme pesquisas já apresentadas na revisão literária. Sendo que o valor mínimo estabelecido pelo processo Bison Wood-Cement Board (1978) é de 91 kgf/cm² (8,92 MPa).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, incluindo a caracterização dos materiais e os ensaios realizados nas etapas do programa experimental.

4.1 Caracterização dos materiais

Os ensaios para a caracterização dos materiais, conforme apresentados no Capítulo 3, mostram que a areia utilizada como agregado miúdo convencional classifica-se como areia média, com dimensão máxima característica de 2,36 mm e MF igual à 1,38. A análise granulométrica da areia média demonstrou que 20,53% da areia é passante na malha 0,15 mm e 0,07% fica retida na malha 2,36 mm (Tabela 14 e Figura 13).

Tabela 14 - Módulo de finura e dimensão máxima da areia média			
Peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,50	-	-	-
6,30	-	-	-
4,75	-	-	-
2,36	0,72	0,07	0,07
1,18	3,34	0,33	0,41
0,60	39,68	3,96	4,37
0,30	523,26	52,33	56,71
0,15	205,28	20,53	77,24
Fundo	227,560	22,76	100,00
Soma	999,84	100,00	
D _{máx}	2,36		
MF	1,38		

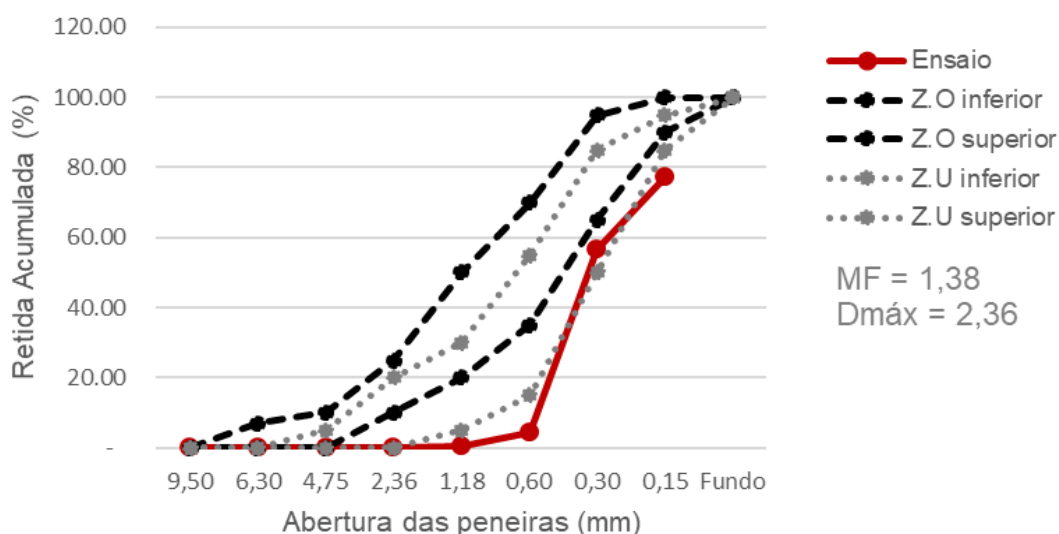
Legenda: dimensão máxima característica (D_{máx}) e módulo de finura (MF).

Fonte: Autor (2024)

A análise granulométrica do resíduo *Pinus* spp. demonstrou que 86,16% da farinha de madeira é passante na malha 0,15 mm e 0,25% fica retida na malha 2,36 mm. As pesquisas de Castro, Parchen e Iwakiri (2019) e Silva *et al.* (2021), obtiveram bons resultados nos comportamentos mecânicos e físicos com resíduos de madeiras com dimensão máxima característica de 2,36 mm (Tabela 15 e Figura 14).

O resultado do MF de 0,8974, pode ser classificado como agregado leve de granulometria fina. Se comparado com a pesquisa de Matoski *et al.* (2007), que utilizou quatro tipos de farinha de madeira, com os respectivos MFs: 0,28, 0,75, 1,50 e 1,57, observa-se que o MF da pesquisa seria intermediário, e se comparado aos seus, o MF estaria na média.

Figura 13 - Curva granulométrica da areia média



Fonte: Autor (2024)

Tabela 15 - Módulo de finura e dimensão máxima do *Pinus* spp.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,50	-	-	-
6,30	-	-	-
4,75	-	-	-
2,36	0,25	0,25	0,25
1,18	0,20	0,20	0,45
0,60	0,43	0,43	0,88
0,30	0,12	0,12	1,00
0,15	86,16	86,16	87,16
Fundo	13,27	13,27	100,43
Soma	100,43	100,43	
D _{máx}	2,36		
MF	0,8974		

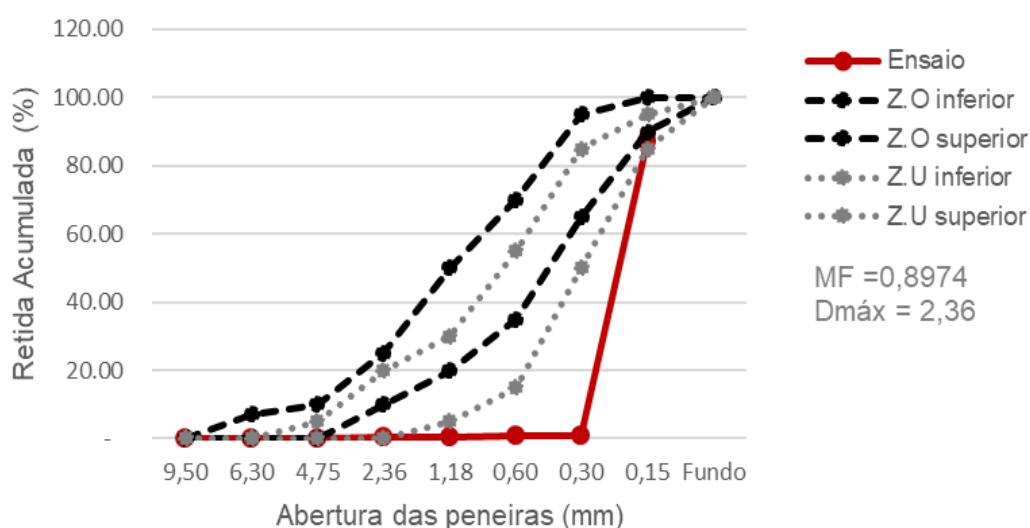
Legenda: dimensão máxima característica (D_{máx}) e módulo de finura (MF).

Fonte: Autor (2024)

Para Ashori, Tabarsa e Sepahvand (2012), em geral, um MF menor da madeira de pínus pode ser vantajoso na fabricação de CMCs por resultar em uma melhor integração com a matriz de cimento, pois as partículas finas e uniformemente distribuídas têm uma maior capacidade de se compactarem durante o processo de

fabricação, resultando em uma estrutura mais densa e homogênea do compósito. Além disso, partículas mais finas tendem a ter uma maior área de superfície, o que pode melhorar a adesão entre a madeira e a matriz de cimento, resultando em uma melhor integração entre os componentes do compósito.

Figura 14 - Curva granulométrica do *Pinus* spp.



Fonte: Autor (2024)

4.2 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A densidade de massa aparente foi determinada utilizando as recomendações da NBR 13280 (ABNT, 2005b). Para a análise dos resultados foram utilizadas as médias dos valores da densidade aparente. Os resultados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados de densidade de massa aparente no estado endurecido

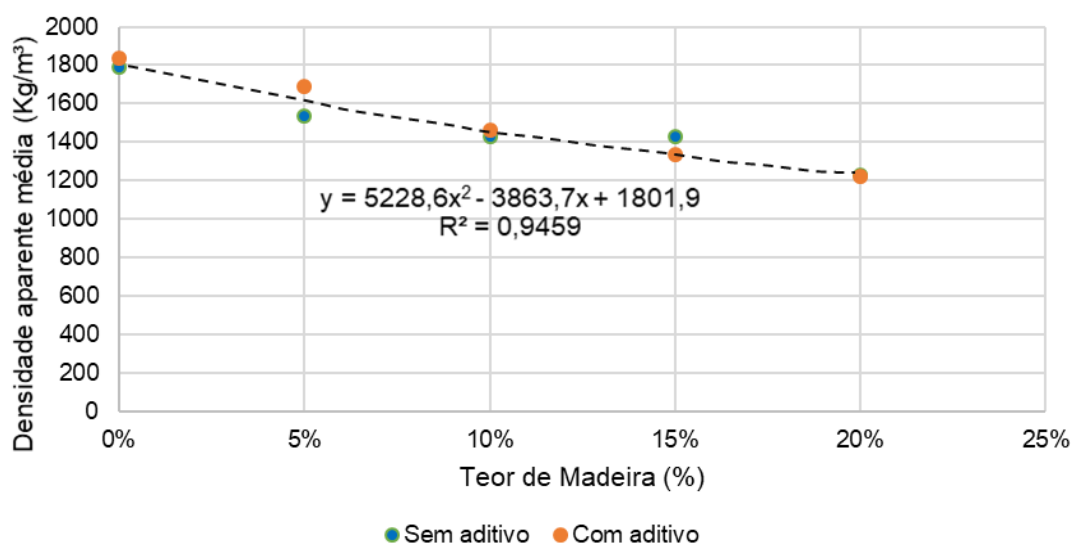
Amostra	Madeira (%)	Aditivo (%)	Densidade aparente média (Kg/m³)
CP0	0%	0%	1788
CP5	5%	0%	1536
CP10	10%	0%	1426
CP15	15%	0%	1428
CP20	20%	0%	1225
CP0A	0%	3%	1834
CP5A	5%	3%	1687
CP10A	10%	3%	1463
CP15A	15%	3%	1335
CP20A	20%	3%	1218

Fonte: Autor (2024)

Os resultados indicam que à medida em que foi sendo inserida a madeira em substituição ao cimento no traço, ocorreu uma redução gradativa da densidade aparente. Os percentuais de redução em relação ao CP0 (referencial) foram CP5 (14,09%), CP10 (20,25%), CP15 (20,13%), CP20 (31,49%), para os compósitos sem adição de aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl_2). Para os compósitos com adição de aditivo, o CP0A obteve um acréscimo de densidade de 2,57%, em relação ao referencial. Porém, para os demais as reduções foram CP5A (5,65%), CP10A (18,18%), CP15A (25,34%) e CP20A (31,88%). Assim, pode-se observar que, em geral, o aumento da porcentagem de madeira ocasionou a redução na densidade, proporcionando maior leveza. Também, a adição de aditivo aumentou a densidade somente nos teores de 0% a 10%. A densidade aparente dos compósitos variou de 1536 Kg/m^3 a 1218 Kg/m^3 e a amostra de menor densidade apresentada foi a referência de 20% de incorporação de madeira com adição de aditivo.

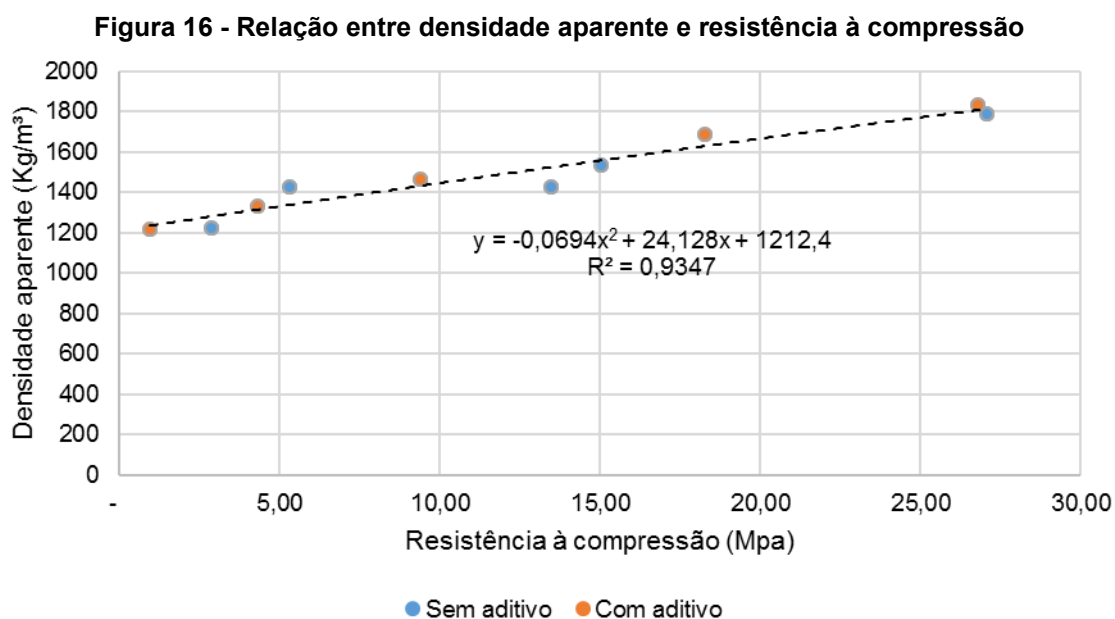
Observa-se na Figura 15 que com o aumento do teor de pó de madeira houve uma redução da densidade, o que é natural, uma vez que a madeira tem densidade menor que a do cimento. Observa-se ainda nessa figura que o melhor ajuste é uma curva polinomial onde o coeficiente de determinação obtido foi de 94,59 %. O coeficiente de determinação é bastante elevado e isso se justifica porque tanto o aumento do teor de pó de madeira quanto o aumento da quantidade de água levaram a uma menor densidade.

Figura 15 - Relação dos valores médios da densidade aparente com o teor de madeira



Fonte: Autor (2024)

Observa-se na Figura 16 que a resistência à compressão diminuiu com a diminuição da densidade. Ou seja, maiores teores de madeira necessitaram de mais água, o que levou a uma diminuição da densidade e consequente diminuição da resistência final. Utilizando o ajuste de uma polinomial onde o coeficiente de determinação obtido foi de 93,47 %, relativamente elevado e novamente justificado pela variação de ambos os fatores.



Fonte: Autor (2024)

4.3 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada seguindo as recomendações de procedimento de ensaio da norma NBR 15259 (ABNT, 2005c), utilizando as mesmas aparelhagens da NBR 13279 (2005a), sendo os resultados apresentados na Tabela 17.

Os resultados indicam que a medida em que foi sendo inserida a madeira em substituição ao cimento no traço, ocorreu um acréscimo gradativo do coeficiente de capilaridade. Os percentuais de acréscimo em relação ao CP0 (referencial) foram CP5 (1,73%), CP10 (3,06%), CP15 (77,45%), CP20 (149,57%), para os compósitos sem adição de aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl_2). Para os compósitos com adição de aditivo foram CP5A (29,93%), CP10A (165,28%), CP15A (136,61%) e CP20A (191,75%). O coeficiente de capilaridade das amostras variou de 2,12 a 6,19

$\text{g/dm}^2.\text{min}^{1/2}$ entre as amostras. Assim, pode-se observar que, em geral, o aumento da porcentagem de madeira ocasiona aumento no coeficiente de capilaridade. Na pesquisa de M. R. Garcez *et al.* (2016), também foi evidenciado que o aumento do teor de madeira no compósito cimento-madeira, aumenta o coeficiente de capilaridade, devido à maior porosidade e capacidade de absorção de água da madeira em comparação com o cimento. Isto, porque o compósito cimento-madeira é uma mistura de dois materiais com propriedades distintas. A incorporação adicional de madeira resulta na formação de uma estrutura mais porosa e menos compacta em comparação com a matriz cimentícia mais densa. Este fenômeno promove a capilaridade, aumentando os caminhos e os vazios disponíveis para o movimento da água.

Tabela 17 - Resultados de absorção de água por capilaridade

Identificação Amostra	Madeira %	Aditivo %	At média (m_{10}) ($\text{g/dm}^2.\text{min}^{1/2}$)	At média (m_{90}) ($\text{g/dm}^2.\text{min}^{1/2}$)	Coeficiente de capilaridade (médio) ($\text{g/dm}^2.\text{min}^{1/2}$)
CP0	0%	0%	0,29	0,62	5,30
CP5	5%	0%	0,18	0,42	3,77
CP10	10%	0%	1,59	1,73	2,19
CP15	15%	0%	1,57	1,71	2,16
CP20	20%	0%	2,47	2,60	2,12
CP0A	0%	3%	0,33	0,72	6,19
CP5A	5%	3%	0,45	0,76	5,02
CP10A	10%	3%	1,40	1,75	5,63
CP15A	15%	3%	1,91	2,08	2,76
CP20A	20%	3%	2,41	2,58	2,66

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que todos os traços com substituição de farinha de madeira por cimento sofreram um aumento na absorção de água por capilaridade aos 10 e 90 min, assim como em seu coeficiente de capilaridade. O mesmo comportamento também foi observado nos estudos de Oliveira (2020) e Savastano *et al.* (2000). Todos concluíram em suas pesquisas que a adição de madeira, aumenta a absorção capilar no interior da compósito. Sendo que densidade, absorção de água e porosidade são propriedades físicas inter-relacionadas, ou seja, quando o conteúdo de partículas aumenta, a absorção de água aumenta, enquanto a densidade diminui.

4.4 Absorção de água por imersão, índices de vazios e massa específica

A determinação da absorção de água por imersão foi realizada seguindo as recomendações de procedimento de ensaio da norma NBR 9778 (ABNT, 2005d), sendo os resultados apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados de absorção de água por imersão

Identificação Amostra	Absorção por imersão (média) g/cm²	Índice de vazios (média) %	Massa específica saturada (média) g/cm²	Massa específica seca (média) g/cm²	Massa específica real (média) g/cm²
CP0	14,31	25,52	2,04	1,78	2,39
CP5	28,40	35,52	1,68	1,33	2,06
CP10	28,45	40,98	1,87	1,46	2,47
CP15	29,02	41,51	1,86	1,45	2,47
CP20	39,79	49,24	1,73	1,24	2,44
CP0A	14,33	26,36	2,10	1,84	2,50
CP5A	18,74	31,66	2,01	1,69	2,47
CP10A	28,78	42,13	1,89	1,46	2,53
CP15A	30,96	43,78	1,85	1,41	2,52
CP20A	38,55	48,96	1,76	1,27	2,49

Fonte: Autor (2024)

Os valores do ensaio de absorção de água por imersão variaram entre 14,31% (referência) e 39,79% (CP20), em que o menor valor correspondeu ao CP0A (14,33%) e o maior valor correspondeu ao CP20 (39,79%). A adição de madeira fez com que o grau de absorção aumentasse gradativamente em níveis diferentes para cada uma das amostras. A madeira naturalmente possui poros em sua estrutura, o que permite que ela absorva água. Assim, quando incorporada em CMCs, essa porosidade da madeira contribui para uma maior capacidade de absorção de água pelo material compósito. Também, quanto maior o teor de madeira no compósito, maior será a proporção de material poroso disponível para absorver água. Isso pode levar a um aumento gradativo do grau de absorção de água à medida que a quantidade de madeira no compósito aumenta.

Observa-se que, em geral, os traços com adição de cloreto de cálcio, diminuíram a absorção de água, em relação ao traço sem aditivo. O cloreto de cálcio é conhecido por suas propriedades dessecantes, o que significa que tem a capacidade de absorver a umidade do ambiente. Quando adicionado ao CMC, o cloreto de cálcio pode absorver a umidade presente no material, reduzindo assim a quantidade de água disponível para ser absorvida por capilaridade. A presença de cloreto de cálcio pode levar à formação de precipitados ou cristais nos poros do

compósito. Isso pode bloquear parcialmente os poros, reduzindo a capacidade do material de absorver água por imersão.

Os valores do índice de vazios variaram entre 25,52% (referência) e 49,24% (CP20), em que o menor valor correspondeu ao CP0A (26,36%) e o maior valor correspondeu ao CP20 (49,24%). A adição de madeira fez com que o índice de vazios aumentasse gradativamente em níveis diferentes para cada uma das amostras. Como visto nos resultados da absorção de água, o aumento do teor de madeira contribuiu para uma maior quantidade de espaços vazios entre as partículas de madeira, aumentando assim o índice de vazios. Assim, quanto maior o teor de madeira, menor a massa específica dos compósitos e, conseqüentemente, maior a porosidade do material.

Observa-se que os traços com adição de cloreto de cálcio, diminuíram os índices de vazios nas amostras CP5A (31,66 %) e CP20A (48,96%) e aumentaram nas amostras CP10A (42,13%) e CPA15A (43,78), em relação ao traço sem aditivo. A adição de cloreto de cálcio em compósitos, geralmente espera-se que diminua o índice de vazios ou pelo menos não o aumente significativamente. Isso porque o aditivo ocupa os espaços vazios na matriz de CMCs, diminuindo assim o volume de poros disponíveis, resultando na redução no índice de vazios. Além, de melhorar a capacidade de compactação da mistura, melhorando a distribuição uniforme das partículas de madeira na matriz de cimento e na redução dos vazios entre as partículas. O fato de haver aumentado o índice de vazios nas amostras CP10A (42,13%) e CPA15A (43,78%), pode ser devido ao processo de confecção dos corpos de prova, pois segundo Ashori, Tabarsa e Sepahvand (2012), o aumento de espaços vazios também pode estar relacionado à compactação inadequada do material.

4.5 Resistência à tração na flexão

Os ensaios para a determinação da resistência à tração na flexão, foram realizados segundo as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005a), sendo os resultados apresentados na Tabela 19.

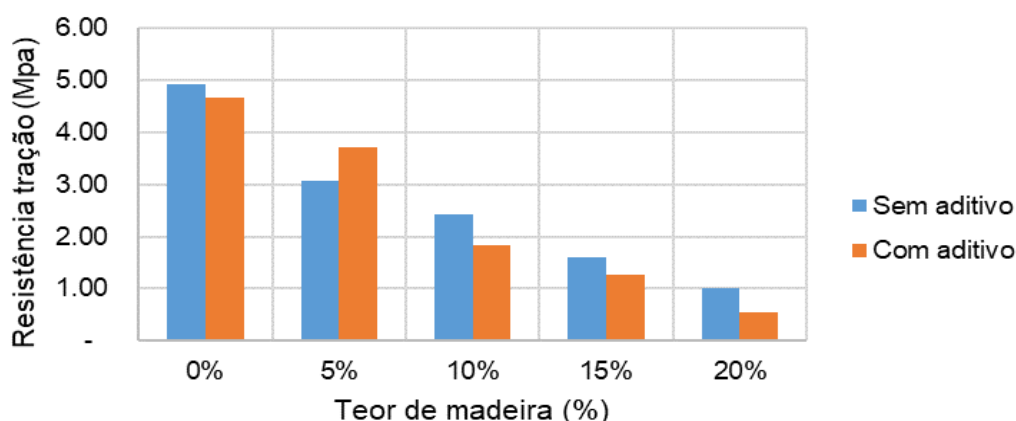
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão

Identificação Amostra	Teor de Madeira %	Resistência média tração na flexão MPa	Variância	Desvio Padrão MPa	Coefficiente de Variação %
CP0	0%	4,93	0,03	0,17	0,04
CP5	5%	3,07	0,08	0,29	0,09
CP10	10%	2,43	0,05	0,21	0,09
CP15	15%	1,61	0,08	0,28	0,17
CP20	20%	1,01	0,04	0,21	0,21
CP0A	0%	4,66	0,07	0,27	0,06
CP5A	5%	3,71	0,05	0,23	0,06
CP10A	10%	1,84	0,04	0,20	0,11
CP15A	15%	1,27	0,06	0,24	0,19
CP20A	20%	0,55	0,02	0,12	0,22

Fonte: Autor (2024)

Os resultados indicam que à medida que foi sendo inserida madeira em substituição do cimento no traço, ocorreu uma redução gradativa da resistência média tração na flexão. Os percentuais de redução em relação ao CP0 (referencial) foram CP5 (37,70%), CP10 (50,60%), CP15 (67,39%), CP20 (79,57%), para os compósitos sem adição de aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl_2). Para os compósitos com adição de aditivo os percentuais de redução foram CP0A (5,54%), CP5A (24,65%), CP10A (62,76%), CP15A (74,15%) e CP20A (88,82%). A redução gradativa da resistência tração já era esperada, pois as partículas de pínus contribuíram para inibir a cura do cimento Portland, provocando a diminuição significativa da resistência à tração na flexão. As pesquisas de Na *et al.* (2014) e Maher (2006), já haviam mostrado que as quantidades de extrativos da madeira, provocam diferentes efeitos sobre a hidratação do cimento, e a composição granulométrica pode influenciar na compatibilidade entre o cimento e a madeira.

Figura 17- Relação entre teor de madeira e a resistência a tração na flexão

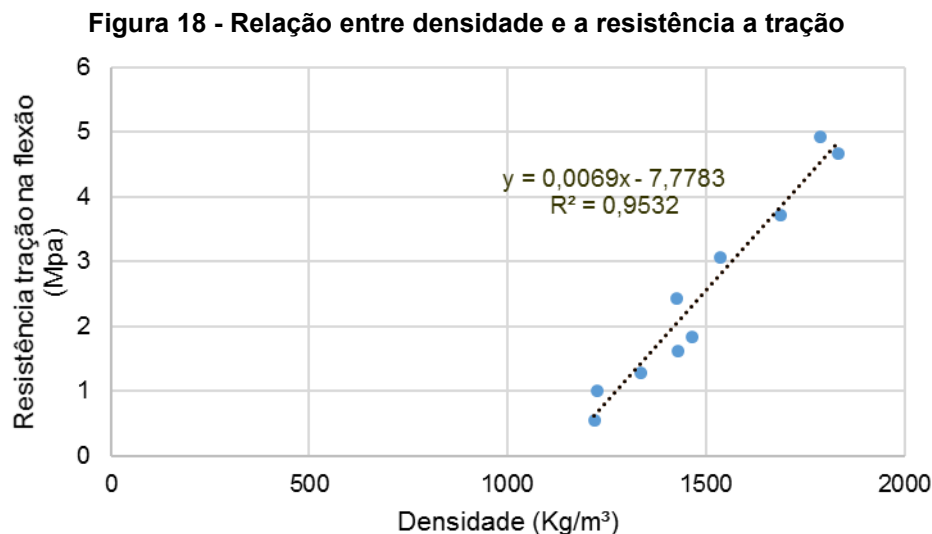


Fonte: Autor (2024)

Os resultados demonstram que para a substituição de até 10% de madeira no compósito os valores ainda ficam próximos do esperado quando comparados a trabalhos como de Machado *et al.* (2019), que também utilizaram cimento CP V ARI e pínus nas proporções de 7,5, 11,3 e 15, obtendo resistências de 1,5, 0,6 e 0,1 MPa. De forma semelhante, Parchen (2012) obteve valores médios de 0,77 MPa para o tratamento das partículas com hidróxido de cálcio e lavagem posterior, e resultado médio de 1,28 MPa para o tratamento com hidróxido de cálcio sem a lavagem posterior.

Segundo Çomak, Bideci e Bideci (2018), a dispersão da farinha de madeira, pode influenciar no desempenho mecânico dos corpos de prova durante a colocação dos compósitos nos moldes, principalmente na propriedade de resistência à tração na flexão. Talvez, esse possa ser o motivo da variação no valor de resistência do CP20A em relação ao CP20, pois, de modo geral, o aditivo não obteve influência significativa.

A Figura 18 mostra a relação obtida entre a resistência a tração na flexão e a densidade. Os valores utilizados para a determinação dessa relação são os valores médios resistência à tração na flexão e da densidade para todos os teores de farinha. O coeficiente de correlação obtido ($R^2 = 0,9532$) demonstra que quanto mais compactado for o corpo de prova, maior a resistência à flexão. Ou seja, existe uma correlação direta entre densidade e resistência à flexão. A densidade do compósito afetava diretamente sua resistência à tração na flexão. Quanto maior os valores da densidade maior a resistência. Esta mesma relação também foi encontrada nos estudos de Ghofrani e Fazeli (2020) e Fuwape e Oyagade (1993) ao investigarem as propriedades mecânicas de CMC.



Fonte: Autor (2024)

4.6 Resistência à compressão

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão axial, foram realizados segundo as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005a), utilizando as duas partes dos rompimentos dos seis corpos de prova por amostra (traço) do ensaio de resistência à tração na flexão. Para a análise dos resultados foram utilizadas as médias dos valores da resistência à compressão, e para a interpretação das variáveis quantitativas foram calculadas medidas de dispersão (variância, desvio padrão e coeficiente de variação). Os resultados estão apresentados na Tabela 20.

A variância demonstrou que os valores estão próximo do valor médio, pois quanto menor é a variância, mais próximos os valores estão da média. Também foi aplicado o desvio padrão para verificar o grau de dispersão, e verificou que a dispersão é baixa, pois quanto mais próximo de zero for o desvio padrão, mais homogêneo são os dados. Além do coeficiente de variação, que demonstrou que a variabilidade dos dados em torno da média é pequena, ou seja, os dados são homogêneos.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão

(continua)

Identificação Amostra	Teor de madeira %	Resistência média à compressão MPa	Variância	Desvio Padrão MPa	Coeficiente de Variação %
CP0	0	27,05	0,50	0,71	0,03
CP5	5	15,05	0,71	0,84	0,06

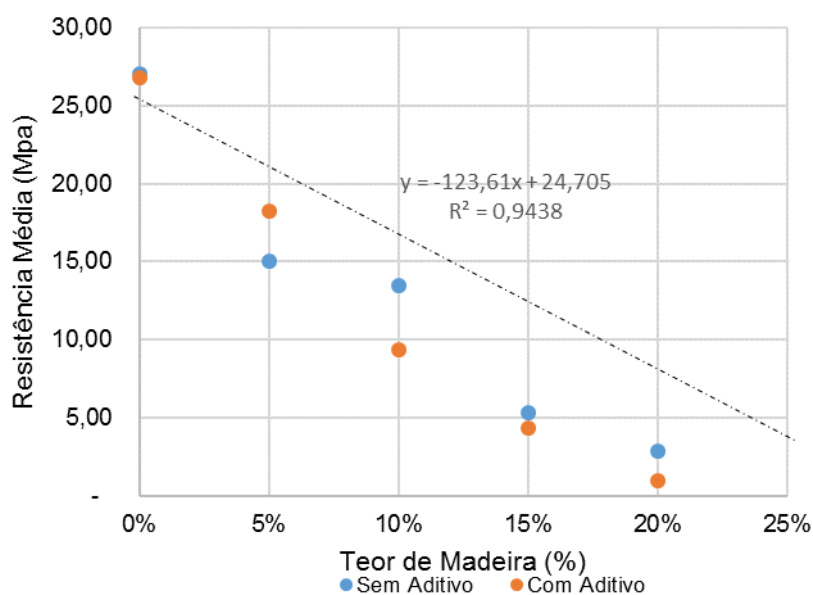
Tabela 20 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão

					(conclusão)
Identificação Amostra	Teor de madeira %	Resistência média à compressão MPa	Variância	Desvio Padrão MPa	Coeficiente de Variação %
CP15	15	5,30	0,59	0,77	0,14
CP20	20	2,89	0,30	0,54	0,19
CP0A	0	26,77	0,56	0,75	0,03
CP5A	5	18,26	0,60	0,78	0,04
CP10A	10	9,39	0,51	0,71	0,08
CP15A	15	4,30	0,54	0,73	0,17
CP20A	20	0,97	0,03	0,16	0,17

Fonte: Autor (2024)

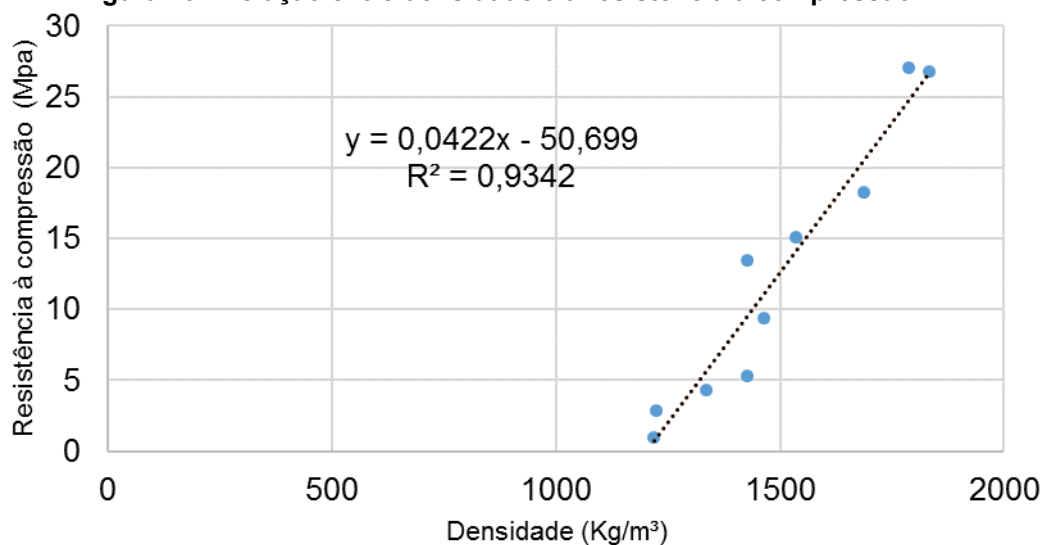
A partir dos resultados obtido, observa-se que até o teor de 10% de pó de madeira as tensões são relativamente elevadas, reduzindo de forma mais acentuada para os teores de 15% e 20% de madeira. Em relação a adição de aditivo, apenas no teor de 5% obteve-se uma resistência maior que o sem aditivo, os demais teores resultaram em valores inferiores aos sem aditivo. Na Figura 19 observa-se o valor de $R^2=94,38\%$ e correlação de 0,9715, no que consiste um elevado coeficiente de determinação entre a resistência à compressão e o teor de pó. A forte correlação pode ser explicada pelo fato de que o aumento do teor de pó de madeira, além de reduzir a resistência à compressão, ocasionou um aumento da quantidade de água, que também levou à redução da resistência. A resistência também diminui conforme se aumentou o teor de madeira na mistura, porque o cimento é o material ligante do composto.

Os ensaios mostraram que a resistência à compressão diminui conforme foi aumentado o teor de madeira na mistura. Isto acontece porque, segundo Garcez *et al.* (2016), a incorporação do resíduo de madeira tende a gerar um compósito com menor densidade e, conseqüentemente, menor resistência à compressão. Assim, de modo geral, o aumento da quantidade de partículas de madeira presente nas composições contribuiu para a diminuição da resistência à compressão, podendo ser provocado pelo fato de que a incorporação de uma maior quantidade de partículas de madeira aumenta significativamente a absorção de água e os vazios nos compósitos propiciando o enfraquecimento da estrutura interna.

Figura 19 - Relação entre teor de madeira e a resistência à compressão

Fonte: Autor (2024)

A Figura 20 mostra a relação obtida entre a resistência à compressão e a densidade. Os valores utilizados para a determinação dessa relação são os valores médios de resistência à compressão e da densidade para todos os teores de farinha. O coeficiente de correlação obtido demonstra uma correlação direta entre densidade e resistência à compressão, e diminui regularmente em correspondência com o teor de madeira. Esta mesma relação também foi observada por Bejó, Takats e Vass (2005), que explicam como sendo devida ao aumento da densificação da madeira, eliminação de lacunas e melhor ligação entre matriz e madeira.

Figura 20 - Relação entre densidade e a resistência à compressão

Fonte: Autor (2024)

Na pesquisa, adotou-se como aceitável a resistência mínima exigida para bloco estrutural de 3 MPa, sendo a resistência de 6 MPa o valor mais comum no mercado. Além da recomendação do RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures), em que a resistência à compressão simples deve ser maior ou igual a 0,5 MPa aos 30 dias para concretos leves para fins de isolamento. Assim, identificou-se que a substituição de até 15% de madeira no compósito, os valores ainda ficam próximos do esperado. A adição de aditivo não exerceu influência considerável na resistência das amostras. Nos teores acima de 5% de madeira, as resistências das amostras foram mais baixas que as amostras sem aditivo.

4.7 Módulo de elasticidade (MOE) dinâmico

Os ensaios para a determinação do MOE dinâmico em amostras de argamassa foram realizados segundo as diretrizes da NBR 15630 (ABNT, 2008), através do aparelho de ultrassom Proceq Pundit PL-200 UPV. A Tabela 21 apresenta os valores médios de seis repetições, resultando o módulo médio de elasticidade dinâmico (E_d).

Tabela 21 - Resultados dos ensaios do MOE dinâmico		
Identificação Amostra	Velocidade média de propagação da onda (menor lida)	Módulo médio de elasticidade dinâmico
	mm/ μ s	MPa
CP0	3,05	15.367
CP5	2,51	8.800
CP10	2,17	6.429
CP15	2,11	6.007
CP20	1,50	2.506
CP0A	2,99	14.732
CP5A	2,65	10.694
CP10A	2,23	7.165
CP15A	2,21	6.016
CP20A	1,71	3.164

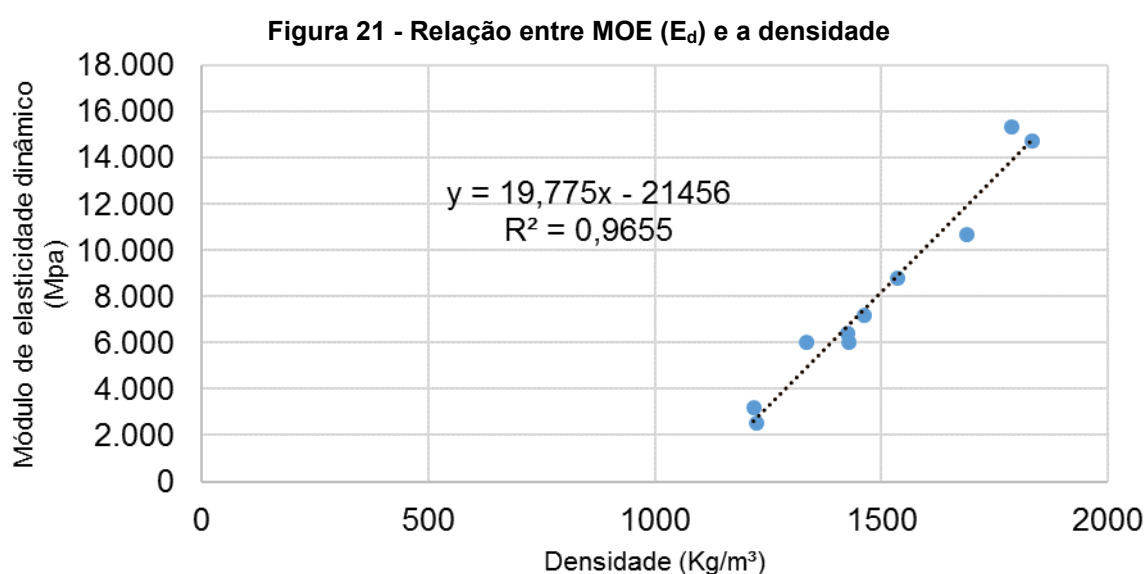
Fonte: Autor (2024)

Os resultados indicam que à medida que foi sendo inserida a madeira em substituição do cimento no traço, ocorreu uma redução gradativa do MOE dinâmico (E_d). Os percentuais de redução em relação ao CP0 (referencial) foram CP5 (4,91%), CP10 (4,95%), CP15 (8,76%) e CP20 (57,48%) para os compósitos sem adição de aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl_2). Para os compósitos com

adição de aditivo os percentuais de redução foram CP0A (4,13%), CP5A (4,46%), CP10A (10,12%), CP15A (11,29%) e CP20A (78,74%).

Essa redução já era esperada, principalmente em relação o traço referencial, decrescendo quanto maior o percentual de madeira presente no compósito. Isso porque, segundo Frybort *et al.* (2008), a interface entre a matriz cimentícia e as partículas de madeira é influenciada pela presença de água, uma vez que as partículas de madeira úmida apresentam menor resistência à flexão, o que as torna mais flexíveis e menos capazes de inibir a fissuração da matriz de cimento. Porém, verificou-se que os corpos de prova com adição de aditivo obtiveram um percentual de redução menor que os sem aditivo, pois minimizam o problema de incompatibilidade, aceleram a hidratação do cimento, melhoram a impregnação de partículas e a homogeneidade da madeira com o cimento.

Também foi verificado que quanto maior velocidade maior o E_d . Isso deve-se ao teor de madeira no compósito, pois quanto maior a densidade, maior o E_d , tendo em vista que o MOE dinâmico é uma função do quadrado da velocidade de propagação da onda e da densidade. Em suma, os resultados mostraram que quanto maior o teor de madeira, menor a densidade, concomitantemente menor a velocidade e menor o E_d . Observa-se na Figura 21 que o coeficiente de determinação obtido da relação E_d e densidade é bastante elevado 96,55%, confirmando a tendência.



Fonte: Autor (2024)

4.8 Módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR)

Os cálculos para obter MOE estático e MOR, foram realizados através dos dados resultantes dos ensaios da resistência à tração na flexão, por intermédio das equações citadas anteriormente. A Tabela 22 apresenta os valores médios de seis repetições, resultando no MOE estático médio e no MOR médio.

Tabela 22 - Resultados do MOE estático e MOR

Identificação Amostra	Massa específica aparente Kg/m³	MOE estático MPa	Coefficiente de Variação %	MOR MPa	Coefficiente de Variação %
CP0	1788	2.422	0,06	49,25	0,04
CP5	1536	2.303	0,16	31,00	0,09
CP10	1426	2.302	0,07	24,53	0,09
CP15	1428	2.209	0,12	16,24	0,17
CP20	1225	1.030	0,15	10,17	0,21
CP0A	1834	2.808	0,06	47,03	0,06
CP5A	1687	2.314	0,08	37,52	0,06
CP10A	1463	2.149	0,04	10,85	0,11
CP15A	1335	2.177	0,09	12,87	0,19
CP20A	1218	515	0,12	5,56	0,22

Legenda: módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR).

Fonte: Autor (2024)

Tanto os valores de MOE estático (E_{ci}) quanto os valores de MOR diminuíram com o aumento do percentual de pó de madeira inserido nos compósitos. Os resultados indicam que à medida que foi sendo inserida a madeira em substituição ao cimento no traço, ocorreu uma redução gradativa do MOE estático (E_{ci}). Segundo Frybort *et al.* (2008), isso acontece porque existe uma correlação linear inversa entre a proporção cimento/madeira e o E_{ci} .

Os percentuais de redução em relação ao CP0 (referencial) foram CP5 (42,74%), CP10 (58,17%), CP15 (60,91%) e CP20 (83,69%) para os compósitos sem adição de aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl_2). Para os compósitos com adição de aditivo, houve aumento do percentual do CP0A (15,96%) em relação ao traço referência, e redução nos CP5A (4,46%), CP10A (10,12%), CP15A (11,29%) e CP20A (78,74%). Ao adicionar cloreto de cálcio em compósitos, geralmente espera-se melhorar o MOE estático, pois acelera o processo de hidratação do cimento, resultando em uma matriz de concreto mais densa e forte. Assim, pode aumentar a rigidez geral do compósito e melhorar suas propriedades mecânicas, incluindo o

MOE. Porém, houve aumento somente nos traços CP0A e CP5A em relação aos traços sem aditivo.

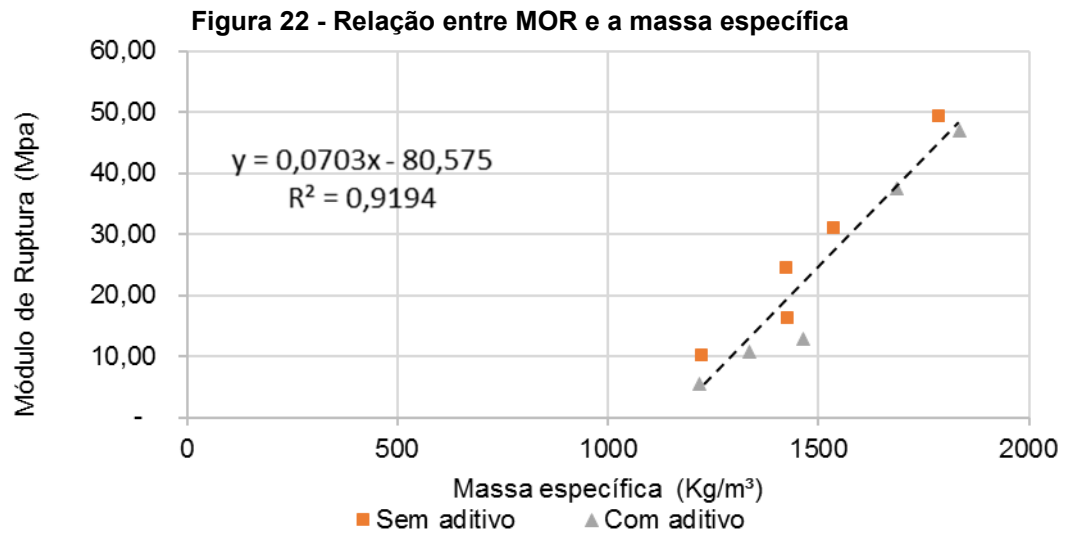
Os valores obtidos para o MOE ficaram entre 515 e 2.808 MPa. Na pesquisa, foi adotado como aceitável, o MOE acima de 4.000 MPa, conforme pesquisas já apresentadas na revisão literária, sendo que WCP comerciais produzidos no processo Bison Wood-Cement Board (1978) pela indústria internacional apresentam valores de MOE em torno de 30.000 kgf/cm² (2941,99 MPa). Assim, nenhuma amostra ficou acima do valor aceitável.

Os resultados indicam que à medida que foi sendo inserida a madeira em substituição ao cimento no traço, ocorreu uma redução gradativa do MOR. Segundo Erakhrumen *et al.* (2008), isso acontece porque quanto menor a relação madeira/cimento, maior a densidade e/ou massa específica do compósito e concomitantemente maior o MOR, em MPa. As pesquisas de Semple e Evans (2004) e Iwakiri e Prata (2008), também demonstraram esta correlação

Os percentuais de redução em relação ao CP0 (referencial) foram CP5 (37,07%), CP10 (50,20%), CP15 (67,03%) e CP20 (79,35%) para os compósitos sem adição de aditivo à base de cloreto de cálcio (CaCl₂). Para os compósitos com adição de aditivo, os percentuais de redução em relação ao CP0 (referencial) foram CP0A (4,51%), CP5A (23,82%), CP10A (73,87%), CP15A (11,29%) e CP20A (88,70%).

Observa-se que na Figura 22 que com o aumento da massa específica aparente do compósito há um aumento do MOR. Para Bejó, Takats e Vass (2005), existe uma relação positiva entre a massa específica do compósito e as propriedades mecânicas como um todo. Quando há uma maior massa específica, existe uma maior pressão durante o processo de produção, no que resulta na densificação da madeira, eliminando os vãos e melhorando a conectividade entre o cimento e a madeira, resultando em um MOR maior. Observa-se nessa figura que o coeficiente de determinação obtido é bastante elevado 91,94%, confirmando a tendência.

Os valores obtidos para o MOR ficaram entre 37,52 e 5,56 MPa. Na pesquisa, foi adotado como aceitável, o MOR acima de 10,0 MPa, conforme pesquisas já apresentadas na revisão literária. Sendo que o valor mínimo estabelecido pelo processo Bison Wood-Cement Board (1978) é de 91 kgf/cm² (8,92 MPa). Assim, apenas o CP20A (5,56 MPa) ficou abaixo do aceitável.



Fonte: Autor (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados nos ensaios que determinaram as propriedades físicas e mecânicas do CMC permitiram elencar as conclusões abordadas a seguir.

A adição de cloreto de cálcio aumentou somente o compósito com teor de 10% de madeira, não tendo uma influência preponderante nas amostras em âmbito geral. Porém, as proporções de farinha de madeira afetaram diretamente o valor da densidade do compósito, pois, à medida que aumentavam os teores de madeira, reduzia-se a densidade, proporcionando maior leveza. Em geral, as características que tornam os CMCs vantajosos em comparação a outros materiais usuais na construção civil, são a sua baixa densidade, pois tornam-se mais fáceis e práticos de transportar e manusear.

Os resultados da absorção por capilaridade do compósito demonstraram uma relação direta do coeficiente de capilaridade e absorção de água com os teores de madeira, pois, com o aumento do teor de madeira, aumentou-se o coeficiente e absorção de água. À medida que aumentava a adição de madeira, aumentava o grau de absorção e os índices de vazios, e a adição de cloreto de cálcio diminuía a absorção de água e os índices de vazios nas amostras em relação às sem aditivo.

Os ensaios para resistência à tração na flexão demonstraram que o aumento de teor de madeira reduz a resistência do compósito. Além disso, o coeficiente de correlação ($R^2 = 0,9532$) obtido demonstra que quanto mais compactado for o corpo de prova, maior a resistência à flexão, ou seja, existe uma correlação direta entre densidade e resistência à flexão. Em relação à adição de aditivo, somente a CP5A (3,71 MPa) obteve acréscimo de resistência em relação à amostra sem aditivo.

Os ensaios para a resistência à compressão axial demonstraram que o teor de até 10% resultou em tensões relativamente elevadas, reduzindo-se de forma acentuada para os teores de 15% e 20%. Também existe um elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9438$) entre resistência à compressão e o teor de farinha de madeira, e uma correlação direta ($R^2 = 0,9532$) entre densidade e resistência à flexão.

Os ensaios de resistência à compressão demonstraram que a substituição de até 15% de madeira no compósito (CP15 = 2,11 MPa e CP15A = 2,21 MPa) resultou em valores próximos da resistência mínima exigida para bloco estrutural que é 3 MPa, sendo a resistência de 6 MPa o valor mais comum no mercado. A

adição de aditivo não exerceu influência considerável na resistência das amostras. Nos teores acima de 5%, a resistência das amostras com madeira foi mais baixa do que nas amostras sem aditivo.

Os ensaios de MOE dinâmico demonstraram uma correlação direta com os teores de farinha de madeira. Assim, quanto maiores os teores de madeira, menor a densidade, e concomitantemente menor a velocidade e menor o MOE dinâmico. A adição de aditivo cloreto de cálcio não influenciou na melhora do MOE dinâmico.

Há uma correlação linear entre a proporção madeira/cimento e o MOE. À medida que foi sendo inserida a madeira em substituição ao cimento no traço, ocorreu uma redução do MOE. A adição de aditivo não resultou em uma melhora geral nos valores do MOE. Os valores obtidos, que ficaram entre 515 e 2.808 MPa, não ficaram no mínimo aceitável da pesquisa que é 4 MPa.

Os valores obtidos para o MOR ficaram entre 37,52 e 5,56 MPa. Na pesquisa, foi adotado como aceitável, o MOR acima de 10,0 MPa, conforme pesquisas já apresentadas na revisão literária. Assim, apenas o CP20A (5,56 MPa) ficou abaixo do aceitável. Também, observou-se que existe uma correlação linear entre MOR e massa específica, ou seja, quanto maior a massa específica, maior o MOR.

Conclui-se, portanto, que os valores obtidos das propriedades físicas e mecânicas do CMC de baixa densidade, em sua maioria, atenderam aos valores estipulados nas normas e pesquisas citadas como critérios mínimos aceitáveis. Além disso, a adição de aditivo não trouxe uma melhora efetiva nas propriedades analisadas.

Como trabalhos futuros, sugere-se a investigação das propriedades físicas e mecânicas para a produção de painéis modulares, para utilização como paredes e divisórias, a fim de viabilizar um material leve e sustentável com menor valor agregado.

REFERÊNCIAS

- ACIU, C.; COBÎRZAN, N. Use of agricultural products and waste in the building materials industry. **Proenvironment Promediu**, v. 6, n. 15, 2013. Disponível em: <https://journals.usamvcluj.ro/index.php/promediu/article/view/9708>. Acesso em: 17 jun. 2024.
- ADENIYI, A. G. *et al.* A review of coir fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 176, p. 107305, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107305>
- AGGARWAL, L. K.; AGRAWAL, S. P.; THAPLIYAL, P. C.; KARADE, S. R. Cement-bonded composite boards with arhar stalks. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 44-51, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.07.004>
- ALBERTO, M. M.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. Compatibility of some hardwoods species with Portland cement using isothermal calorimetry. **Forest Product Journal**, [S.L.], v. 50, n. 9, p. 83-88, 2000.
- AL-MEFARREJ, H. Testing and enhancing the compatibility of five Saudi wood species for cement-bonded particleboard industry. **Alexandria Science Exchange Journal: An International Quarterly Journal of Science Agricultural Environments**, [S.L.], v. 30, p. 333-343, 2009. <http://dx.doi.org/10.21608/asejaiqjsae.2009.3246>
- ALMEIDA, R. R. *et al.* Utilization of the coconut shell of babaçu (*Orbignya* sp.) to produce cement-bonded particleboard. **Bioresource Technology**, v. 85, n. 2, p. 159-163, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00082-2)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM C 125 - 03: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. West Conshohocken, 2003.
- ARRUDA FILHO, N. T. de *et al.* Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 16, p. 894-902, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000800012>
- ASHORI, A.; TABARSA, T.; SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from Poplar strands. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 26, p.131-134, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.001>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO - ABCIC. **ABRAIN e FGV publicam estudo sobre necessidades habitacionais**. 2018. Disponível em: <http://www.industrializaremconcreto.com.br/Edicoes/Exibir/abrainc-e-fgv-publicam-estudo-sobre-necessidades-habitacionais>. Acesso em: 17 jun. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. São Paulo, 2021. Disponível

em: <https://abcp.org.br/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. 2019. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Preparo da mistura para realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2019b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12989**: Cimento Portland branco - Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13116**: Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14810-3**: Chapas de madeira aglomerada. Parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação

do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5732:** Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5735:** Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5736:** Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5737:** Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7217:** Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 1987

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522:** Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248:** Agregados. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM ISO 3310-1:** Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT). Rio de Janeiro, 2010.

AZAMBUJA, R. R. *et al.* Performance of two types of cement in production of cement bonded wood panels combined with rice hull. **Floresta**, v. 44, n. 4, 2014. Disponível

em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/5539/2c30257b703a2b4ea1598ac5288256f4dc16.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2024.

BALEA, A. *et al.* Nanocelluloses: natural-based materials for fiber-reinforced cement composites. A critical review. **Polymers**, v. 11, n. 3, p. 518, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11030518>

BARACHO JUNIOR, E. *et al.* **Uso de resíduos lignocelulósicos na confecção de compósitos de cimento e areia para fins construtivos não estruturais**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/4989>. Acesso em: 17 jun. 2024.

BATISTA, A. M. A influência do tratamento em compósitos de cimento-madeira. **Projeções**, v. 19, n. 20, p. 1-3, 2002.

BATISTA, A. M.; MASCIA, N. T. Estudo comparativo entre vigas mistas formadas por perfis em chapa dobrada de aço e madeira serrada e os principais sistemas estruturais. **Revista Ceciliana**, n. 16, p. 13-32, 2001. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2243736>. Acesso em: 17 jun. 2024.

BEJÓ, L.; TAKATS, P.; VASS, N. Development of cement bonded composite beams. **Acta Silvatica e Lignaria Hungarica**, [S.L.], v. 1, p. 111-119, 2005.

BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósito Eucalyptus grandis-cimento Portland. **Scientia Forestalis**, [S.L.], v. 65, p. 150-161, 2004.

BERALDO, A. L.; CHEN, F. K. C. H.; AZZINI, A. Telhas onduladas de bambucimento. In: **Encontro Nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis**, São Paulo: USP, ANTAC, v. 3, p. 1-10, 2003.

BERALDO, A. L.; ROLIM, M. M. Efeito de tratamentos sobre a resistência à compressão de compósitos cimento-madeira de reflorestamento. In: **Congresso latinoamericano y II Internacional de ingeniería rural**, Neuquén, Argentina, p. 773-778, 1996.

BERALDO, A. L.; ARRUDA, A. C.; STANCATO, A. C.; SAMPAIO, C. A. P.; FERNANDES FILHO, O. P.; LEONEL, V. M. Compósito à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, Uberlândia, 2002. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2002. p. 85 - 90.

BERALDO, A. L. **Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité**. Tese de Doutorado. Université Henri Poincaré-Nancy 1, França, 1994. Disponível em: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748622>. Acesso em: 17 jun. 2024.

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

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BISON WOOD-CEMENT BOARD. **Bison** – Report 1978. p.10.

BLANKENHORN, P. R. *et al.* Compressive strength of hardwood-cement composites. **Forest products journal**, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 59, 1994.

BOUGUERRA, A. *et al.* Water sorptivity and pore structure of wood–cementitious composites. **Magazine of Concrete Research**, [S.L.], v. 54, n. 2, p. 103-112, 2002. <https://doi.org/10.1680/mac.2002.54.2.103>

CABANGON, R. J.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. Manual strand orientation as means of improving the flexural properties of wood-wool cement boards in the Philippines. **Forest Products Journal**, [S.L.], v. 52, n. 4, p. 53-59. 2002.

CALLISTER JR. W. D., RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering – An Introduction**, 4 ed. Estados Unidos: Wiley, 1997.

CAMPELLO, E. F. **Comportamento em Fadiga de Compósitos Cimentícios Reforçados por Polpa de Bambu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC-Rio, 2006.

CARVALHO, J. V. de. **Aproveitamento de resíduos particulados da madeira de eucalipto grandis na fabricação de compósitos à base de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

CASTRO, V. *et al.* Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de Eucalyptus benthamii Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 38, p. 935-942, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000500018>

CASTRO, V. G. de. **Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro**. Editora: UFERSA, 2021.

CASTRO, V. G. de. **Espécies da Amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Curso de Engenharia Florestal, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

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

CASTRO, V. G. *et al.* Painéis cimento-madeira de Eucalyptussaligna com diferentes aditivos químicos e métodos de formação. **Floresta**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 349-360, 2014. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i2.35765>

CECHIN, L. **Análise da viabilidade de produção de painéis de cimento reforçados com biomassa vegetal e escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

CECHIN, L. *et al.* Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mossô. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0574>

CECHIN, L. *et al.* Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mossô. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, p. e12240, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0574>

CHIN, S. C. *et al.* Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced composites. **Materials Today Communications**, [S.L.], v. 23, p. 100876, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100876>

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. **Ciência Rural**, [S.L.], v.43, n.4, p.610-615, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000400008>

ÇOMAK, B.; BIDEÇI, A.; BIDEÇI, Ö. S.. Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 794-799, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029>

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. Agência CNI de Notícias, 2021. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

CONSELHO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. **Sustentabilidade na Construção**. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/noticia/show.asp?npgCode=DBC0153A-072A-4A43-BB0C-2BA2E88BEBAE>. Acesso em: 17 jun. 2024.

CONSELHO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO – CIB. 2020. Disponível em: <https://www.cibworld.nl/site/home/index.html>. Acesso em 24 de maio de 2023.

CONSELHO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO – CIB. **CIB Annual Report 2022**. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 2022. Disponível em: <https://cibworld.org/cib-annual-report/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

CORINALDESI, V. *et al.* Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 281-289, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.011>

CUNHA, A. B. da; MATOS, J. L. M. de. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("stress wave timer"). **Revista Árvore**, [S.L.], v. 34, p. 345-354, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000200018>

DEL MENEZZI, C.H.S. *et al.* Experimental procedure to produce fiber-cement boards with eucalypts paper mill sludge. 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on the Development of Wood Science, **Wood Technology and Forestry**, ICWSF 2001, Ljubljana, Slovenija. p. 87-96. 2001. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20023061204>. Acesso em: 17 jun. 2024.

DOS SANTOS, R.C. *et al.* Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 241-250, 2008. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74411656008>. Acesso em: 17 jun. 2024.

DRUMOND, P. M. *et al.* **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2017., 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1078373>. Acesso em: 17 jun. 2024.

EMBRAPA. **Paraná apresenta grande potencial para exploração da resinagem em pinus**. Embrapa Florestas, 2021. Disponível em: [https://www.embrapa.br/busca-de-noticias?p_p_id=buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=pop_up&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_groupId=1355099&_buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_articleId=64433895&_buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_viewMode=print#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,Sul%20\(45%20mil%20t\)](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias?p_p_id=buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=pop_up&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_groupId=1355099&_buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_articleId=64433895&_buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_viewMode=print#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,Sul%20(45%20mil%20t).). Acesso em: 17 jun. 2024.

ERAKHRUMEN, A. A. *et al.* Selected physico-mechanical properties of cement-bonded particleboard made from pine (*Pinus caribaea* M.) sawdust-coir (*Cocos nucifera* L.) mixture. **Scientific Research and Essay**, [S.L.], v. 3, n. 5, p. 197-203, 2008.

ERDEN, S., HO, K. Fiber reinforced composites. In **Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering**, Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, Woodhead Publishing, p. 51-79, 2017.

EUROPEAN STANDARD – EN. **EN BS 934 - 1**: Admixtures for concrete, mortar and grout. Common requirements. British Standards Institution, London, 2008.

EUSEBIO, D. A. *et al.* Manufacture of Low-cost Wood-Cement Composites in the Philippines Using Plantation-grown Australian Species. I. Eucalypts. In: **ACIAR PROCEEDINGS**. ACIAR; 1998, 2002. p. 105-114. Disponível em: https://www.aciar.gov.au/sites/default/files/legacy/node/325/pr107_pdf_13752.pdf#page=113. Acesso em: 17 jun. 2024.

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FAN, M. *et al.* Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 36, p. 135-140, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.089>

FAN, M. *et al.* Dimensional instability of cement bonded particleboard: behavior of cement paste and its contribution to the composite. **Wood and Fiber Science**, v. 3, n. 31, p. 306-315, 1999. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1636>. Acesso em: 17 jun. 2024.

FONSECA, J. J. S. **Apostila de metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

FRYBORT, S. *et al.*, Cement bonded composites -a mechanical review, **Bioresources**, [S.L.], v. 3, n. 2, pp. 602-623, 2008.

FRYBORT, S. *et al.* Investigations of the mechanical interactions at the interface of wood-cement composites by means of electronic speckle pattern interferometry. **BioResources**, Raleigh, USA, v. 7, n. 2, p. 2483-2495, 2012.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL - FDC. **Publicações**. 2020. Disponível em: <https://www.fdc.org.br/conhecimento/publicacoes>. Acesso em: 17 jun. 2024.

FUNDO MUNDIAL PARA A NATUREZA - WWF. **Construções em Madeira e Mudanças Climáticas**, 2017. Disponível em; [https://www.wwf.org.br/?56062/Artigo--Construcoes-em-Madeira-e-Mudancas-Climaticas#:~:text=Segundo%20a%20UNEP%20\(United%20Nations,relacionadas%20ao%20consumo%20de%20energia](https://www.wwf.org.br/?56062/Artigo--Construcoes-em-Madeira-e-Mudancas-Climaticas#:~:text=Segundo%20a%20UNEP%20(United%20Nations,relacionadas%20ao%20consumo%20de%20energia). Acesso em: 17 jun. 2024.

FUWAPE, J. A.; OYAGADE, A. O. Bending strength and dimensional stability of tropical wood-cement particleboard. **Bioresource technology**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 77-79, 1993. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(93\)90212-T](https://doi.org/10.1016/0960-8524(93)90212-T)

GARCEZ, M. R. *et al.* Propriedades físicas de compósitos cimento-madeira com serragem de *Pinus elliottii* tratada. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, [S.L.], v. 7, n. 2, 2016. <http://hdl.handle.net/10183/222199>

GARCIA, A; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GASSAN, J. A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. **Composites part A: applied science and manufacturing**, v. 33, n. 3, p. 369-374, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00116-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00116-6)

GASSAN, J., **A study of fiber and interface parameters affecting the fatigue behavior of natural fiber composites**, Institute für Werstofftechnik, University of Kassel, Kassel, Germany, 2001.

GEIMER, R. L. SOUZA, M. R., MOSLEMI, A. A. Accelerated aging of low-density cement-bonded wood composites made conventionally and with carbon dioxide injection. **Drvna Industrija**, v. 47, n. 2, p. 55, 1996. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19970610196>. Acesso em: 17 jun. 2024.

GHOFRANI, M.; FAZELI, A. Effect of density and industrial wood particles to cement ratio on mechanical and physical properties of wood cement composites. **Iranian Journal of Wood and Paper Science Research**, [S.L.], v. 35, n. 4, p. 362-375, 2020. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2021.351532.1630>

GIL, H.; ORTEGA, A.; PÉREZ, J. Mechanical behavior of mortar reinforced with sawdust waste. **Procedia Engineering**. V. 200, p.325–332, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.046>

GUPTA, S.; KUA, H. W. Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar, **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 107–125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095>.

GURUNATHAN, T. *et al.* A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 77, p. 1-25, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>

HÁRI, J.; PUKÁNSZKY, B. 8 - Nanocomposites: Preparation, Structure, and Properties. In: **Plastics Design Library, Applied Plastics Engineering Handbook**. William Andrew Publishing, 2011.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatórios Anuais IBÁ, 2022**. IBÁ, 2022. <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD): síntese de indicadores de 2015**. síntese de indicadores de 2015. 2015. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/habitacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 14 jun. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **PEVS - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=publicacoes>. Acesso em: 07 jul. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SP - IPT. **Catálogo de processos e sistemas construtivos para habitação**. 1. ed. São Paulo, 1998.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SP -IPT. **Catálogo de processos e sistemas construtivos para habitação**. 1. ed. São Paulo, 1998.

ISHIKURA, Y *et al.* Bending properties and cell wall structure of alkali-treated wood. **Cellulose**, Berlin, v. 17, n. 1, p. 47-55, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10570-009-9360-7>

ITAMBÉ. **Relatórios de Ensaio**: cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos. São Paulo: Itambé, 2024. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/assessoria-tecnica/relatorios-de-ensaio/?pro=153>. Acesso em: 17 jun. 2024.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de chapas de madeira aglomerada de cinco espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 137-142, 2001.

IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F.; MENDES, L. M. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Ajir Gráfica. v. 1, p. 1-247, 2005.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68 - 74, 2008. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74414109>. Acesso em: 17 jun. 2024.

JORGE, F. C. *et al.* Wood-cement composites: a review. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 62, n. 5, p. 370-377, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>

JORGE, F. C. PEREIRA, C. FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **European Journal of Wood and Wood Products**, [S.L.], v. 62, n. 5, p. 370-377, 2004. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>

KARADE, S. R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. **Construction and building materials**, [S.L.], v. 24, n. 8, p. 1323-1330, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.003>

KARADE, S. R.; IRLE, M.; MAHER, K. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. *Holz als roh-und werkstoff*, v. 64, n. 4, p. 281-286, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0103-2>

KOLLMANN, F.P.P.; COTÉ JR, W.J. **Principles of wood science and technology - Solid wood**. New York: Springer-Verlag, 1968.

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

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus* spp. na produção de painéis de cimento madeira**. Tese de doutorado (Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, Paraná, 2000.

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Efeitos do tratamento das partículas de *Eucalyptus dunnii* (Maid), da variação da relação madeira-cimento e do uso de aditivos sobre as propriedades físicas e mecânicas de chapas de madeira-cimento. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 68-76, 2000.

LI, J.; LAGHARI, R.A. A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 100, n. 9-12, p. 2929-2943, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2837-5>

LIBRELOTTO, L. I. *et al.* **Bambu: Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável**. Florianópolis:Grupo de Pesquisa Virtuhab/UFSC,2019.

LIMA, A. J. M. **Utilização de resíduo de *Pinus spp* e materiais cimentício alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2009.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de madeira de *Pinus spp*. cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira. **Floresta**, v. 42, n. 3, p. 639-650, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/328062247.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MACÊDO, A. N. *et al.* Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 16, p. 658-667, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000200002>

MACÊDO, A. N. *et al.* Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 16, p. 658-667, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000200002>

MACÊDO, A. N.; SOUZA, A. A. C.; POMPEU NETO, B. B. Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 131-150, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000200009>

MACHADO, V. C. *et al.* Efeito da Sílica Ativa em Argamassas de Chapisco com Amrc. In: Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, **Anais...** v. 13, p. 750-758, 2019. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/4726>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2 ed., 2000.

MAQUINÉ, A. B. **Utilização sustentável de resíduos de beneficiamento de madeiras da Amazônia: um estudo de caso na produção de painéis**. Mestrado (Dissertação) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

MARTINEAU, P., AGOPYAN, V. Conferência Magma I - Compósitos: material inovador. In: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

MARTINHO, P. A. G. **Análise do comportamento de argamassas com a incorporação de pellets de madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. Doutorado (Tese) - Ciências Florestais, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/2378>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Floresta**, v. 37, n. 2, p. 149-158, 2007. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/328062453.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MEDRADO, M. J. S. **Cultivo do Pinus**. 2005. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivodoPinus/10_manejo.htm. Acesso em: 17 ago. 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Edição. São Paulo: Ibracon, 2014.

MENGUE, S. D.A.; MARTINS, R. M. A utilização de residual do manejo do *Pinus* spp.(acículas) em oficina de papel reciclado como ferramenta de Educação Ambiental. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 38-48, 2023. <https://doi.org/10.34024/revbea.2023.v18.14753>

MESA VALENCIANO, M. C. **Durabilidade de compósitos cimentícios com materiais lignocelulósicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2004. <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2004.318585>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Construção Sustentável**. 2020. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/planejamento-ambiental-e-territorial-urbano/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel.html>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MORI, F. A.; LOPES, Y. L. V.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F. Estudo da compatibilidade entre a madeira e a casca de *Eucalyptus grandis* e cimento Portland. **Ciência Florestal**, v. 171, n. 3, p. 57-264, 2007. <https://doi.org/10.5902/198050981957>

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Na evaluation of the rate of heat evolution of Portland cement-Northern Rocky Mountain species. **Wood Fiber and Science**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 164-176, 1983.

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

MOSLEMI, A. A.; PFISTER, S. C. The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, v. 19, n. 2, p. 165-175, 1987. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/592>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MOSLEMI, A. A. Wood-cement panel products: coming of age. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. **Proceedings**, USA, p. 12-18. 1989.

MURAD, J. **As propriedades físicas, mecânicas e meso-estrutural do bambu *Guadua Weberbaueri* do Acre**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica (PUC), Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

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

NAÇÕES UNIDAS BRASIL - ONU. **COP24**: cobertura especial ONU News. Cobertura Especial ONU News. 2018. Disponível em: <https://news.un.org/pt/events/cop24>. Acesso em: 17 jun. 2024.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL – ONU. **17 objetivos para transformar o mundo**, 2020. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/>. Acesso em 20 jul. 2023.

NASLAIN, R. R. Ceramic matrix composites: matrices and processing. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, p. 1060-1066, 2001. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00196-0>

NASSER, R. A. *et al.* Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 72, p. 246-256, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.008>

NCL INDUSTRIES. Cement **Bonded Particle Board**. 2023. Disponível em: <https://nclind.com/cement-particle-boards/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**, tradução Salvador E. Giammusso, 2ª edição revisada atual, São Paulo, Pini, 1997.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement. In: LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**, 4. ed.: Elsevier, 2003. p. 157-250.

OKINO, E. Y. A. *et al.* Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* spp. Cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 333-338, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.046>

OKINO, E.Y.A. *et al.* Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 26, n. 6, p. 729-734, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00061-1)

OLIVEIRA, M. S. **Utilização de resíduos de *Pinus spp.* na produção de blocos de concreto para alvenaria de vedação**. 2020. Mestrado (Dissertação) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 68, p. 96-108, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>

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

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com compactação vibro dinâmica**. Doutorado (Tese) - Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PARCHEN, C. F. A. *et al.* Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites. **European journal of wood and wood products**, [S.L.], v. 74, n. 1, p. 75-81, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-015-0982-1>

PEÇAS, P. *et al.* Natural fibre composites and their applications: a review. **Journal of composites science**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 66, 2018. <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>

PEREIRA, C.; CALCEIRA, F.; FERREIRA, J. M. F.; IRLE, M. A. Characterization of cement-bonded particleboards manufacture with maritime pine, blue gum and cork grown in Portugal. **European Journal of Wood Products**, [S.L.], v. 70, p. 107-111, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-011-0532-4>

PEREIRA, C.; CALCEIRA, F.; IRLE, M. A.; FERREIRA, J. M. F. Characterizing the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in Portugal I: temperature profiles and compatibility indices. **Journal of Wood Science**. n. 52, p. 311-317, 2006.

PIMENTEL, L. L.; CAMARINI, G. Avaliação de compósitos biomassa vegetal-cimento modificados por polímero. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 01, p. 26-33, 2005.

RAHIM, S. *et al.* Cement-bonded particleboard from pre-soaked oil palm trunk: effects of particle size and chemical additive. **Journal of Tropical Forest Products**, v. 1, n. 1, p. 71-77, 1995. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19950618960>. Acesso em: 17 jun. 2024.

RAJAK, D. K. *et al.* Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. **Journal of Materials Research and Technology**, [S.L.], v. 8, n. 6, p. 6354-6374, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. e4-e10, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282000000200003>

RIBEIRO, C. C. *et al.* **Materiais de construção civil**. Editora UFMG, 2002.

RIBEIRO, U. G.; VASCONCELOS, R. P. de. Estudo do desempenho mecânico de compósitos cimento-madeira produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho. **Revista Brasileira de ciência da Amazônia**. In: 1º Simpósio Interdisciplinar das Engenharias de Rondônia. Anais [...], p. 3-5, 2017.

RILEM THECNICALCOMMITTEE 49 TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. *Matériaux et Constructions*, v.17, n.102, 1984.

RILEM. Technical Committee 49 TRF - Test for determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement section. *Matériaux et Constructions*, v.17, n.102, p.441-443, 1989.

ROCHA, T. M. S. **Contribuição ao Desenvolvimento de Placas Para Vedação Vertical Produzidas Com Resíduo de Madeira de Construção, Utilizando Gesso e Cimento Como Aglomerante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R. Análise comparativa entre compósitos minerais produzidos com partículas de madeira passante na peneira 1,2 mm. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 233-244, 2019. <https://doi.org/10.5216/reec.v15i2.52806>

RONALD, W. W.; GJINOLI, A. The use of recycled wood and paper in building applications. **Proceedings of Forest Product Society No**, v. 7286, p. 84-91, 1997.

RUTHES, H. C. *et al.* Análise físico-mecânica de compósitos madeira-cimento e uso de modelos micromecânicos na predição de suas propriedades. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, [S.L.], v. 59, n. 4, p. 1099-1117, 2022.

SÁ, V. A. de *et al.* Mistura de três espécies de reflorestamento na produção de painéis cimento-madeira. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 36, p. 549-557, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300017>

SANJAY, M. R. *et al.* A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization. **Carbohydrate polymers**, [S.L.], v. 207, p. 108-121, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.083>

SANTIAGO, M. O. Aplicações do GRC-cimento reforçado com fibras de vidro em novos estádios de Sevilha, Espanha. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

SAVASTANO JR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 379-384, 2000.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. Manufacture of wood-cement composites from *Acacia mangium*. Part II. Use of accelerators in the manufacture of wood-wool cement boards from *A. mangium*. **Wood and Fiber Science**, p. 120-131, 2007. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/181>. Acesso em: 17 jun. 2024.

SILVA, J.A. da *et al.* Análise das características físicas e propriedades mecânicas de argamassa com inserção de resíduos de madeira. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13008>

SIMATUPANG, M. H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebunder Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**, [S.L.], v. 27, p. 379-382, 1979.

SIMATUPANG, M. H.; SEDDIG, N.; HABIGHORST, C.; GEIMER, R. L. Technologies for rapid production of mineral-bonded wood composite boards. *In*: MOSLEMI, A. Inorganic bonded wood and fiber composite materials. **Forest Products Research Society**, v. 2, p. 18-27, 1991.

SIMATUPANG, M.H.; LANGE, H.; KASIM, A. SEDDING, N. Influence of wood species on the cement and gypsum. International Congress on Fiber and Particleboard with Inorganic Binder. Idaho. **Proceedings**, p. 33-42, 1988.

SOARES, C. H. M. *et al.* Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 9, n. 2, p. 105-115, 2007. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2007000200001>

SOUZA, A. A. C. **Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil; Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

SUTIGNO P. Effect of aqueous extraction of wood-wool on the properties of wood-wool cement board manufactured from Teak (*Tectona grandis*). *In*: **Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region**, 2000, Proceedings [...] Canberra. n.107, 2000. p. 24-28.

SUTIGNO, P. Effect of aqueous extraction of wood-wool on the properties of wood-wool cement board manufactured from Teak (*Tectona grandis*). *In*: EVANS, P. D. **Wood-cement composites in the Asia-Pacific Region**. Canberra: ACIAR, p. 24-28, 2002. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20023140017>. Acesso em: 17 jun. 2024.

TANIGUTTI, E. K.; BARROS, M. M. S. B. de. **Recomendações para a produção de vedações verticais para edifícios com placas de gesso acartonado**. Projeto EPUSP/SENAI: São Paulo, v. 2435, 1998.

ULLAH, K., SHARMA, V. K., DHINGRA, S., BRACCIO, G., AHMAD, M., SOFIA, S. Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 682-698, 2015. Disponível em: cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20153373957. Acesso em: 17 jun. 2024.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. ***Pinus taeda***, 2008. Disponível em: <http://www2.fpl.fs.fed.us/TechSheets/SoftwoodNA/htmlDocs/pinustaeda.html>. Acesso em: 12 ago. 2023.

USDA FOREST SERVICE. ***Pinus taeda***, 2002. Disponível em: <http://www2.fpl.fs.fed.us/TechSheets/softwoodna/htmlDocs/pinustaeda.html>. Acesso em: 12 ago. 2023.

VENTURA, A. M. FM. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, [S.L.], v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

VILLAS-BÔAS, B. T. *et al.* Avaliação dos efeitos de diferentes dosagens de água/cal na resistência à compressão axial de compósitos de madeira-cimento. **Matéria (rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0109>

VITAL, B. R. *et al.* Estabilidade dimensional e resistência à tração perpendicular de painéis fabricados com partículas termorretificadas oriundas de embalagens de *Pinus sp.* **Revista Árvore**, v. 38, p. 951-959, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000500020>

VO, L. TT; NAVARD, P. Treatments of plant biomass for cementitious building materials—A review. **Construction and Building Materials**, [S. L.], v. 121, p. 161-176, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.125>

WANG, X.; YU, Y. The compatibility of two common fast-growing species with Portland cement. **Journal of Indian Academy of Wood Science**, v. 9, n. 2, p. 154-159, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13196-012-0081-4>

Wang, Z., Ma, L.F., Mei, G., He, L.H., Zhang, Q.Y. The impact of raw material ratio of magnesium oxychloride cements bamboo particleboard performance. **Wood Processing Machinery**, v. 23, n. 3, p. 30-32, 2012.

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

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Journal of wood science**, [S.L.], v. 46, p. 444-451, 2000. <https://doi.org/10.1007/BF00765802>

WORD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Toward a Sustainable Cement Industry**. Climate Change, WBCSD, Geneva, 2002.

Disponível em:

<https://docs.wbcsd.org/2002/03/TowardSustainableCementIndustry.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2024.

YE, L. M.; YU, X. J.; HAN, H. Hydration characteristics of *Phyllostachys prominens* wood-cement-water mixtures. **Journal of Zhejiang Forestry College**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 1-4, 2002.

ZHOU, X.; LI, Z. Light-weight wood–magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 382-389, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.033>