



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS JOÃO PESSOA
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA EDUARDA BATISTA FREITAS

**POTENCIAL DE RECICLAGEM DE DORMENTES DE MADEIRA EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUSTENTÁVEIS**

JOÃO PESSOA

2026

MARIA EDUARDA BATISTA FREITAS

**POTENCIAL DE RECICLAGEM DE DORMENTES DE MADEIRA EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUSTENTÁVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito curricular obrigatório para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Coorientador: Dr. José Augusto Gomes Neto

JOÃO PESSOA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

F866p

Freitas, Maria Eduarda Batista.

Potencial de reciclagem de dormentes de madeira em compósitos cimentícios sustentáveis / Maria Eduarda Batista Freitas. – 2026.

65 f. : il.

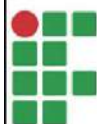
TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro S. dos Anjos.

Coorientador: Prof. Dr. José Augusto Gomes Neto.

1. Argamassa sustentável. 2. Compósito cimento-madeira.
3. Materiais de construção ecológico I. Título.

CDU 691.53/.54



INSTITUTO FEDERAL
Paraíba

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
CAMPUS JOÃO PESSOA

DECISÃO 34/2026 - CBEC/UA1/UA/DDE/DG/IP/REITORIA/IFPB, de 7 de julho de 2026.

MARIA EDUARDA BATISTA FREITAS

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE DORMENTES DE MADEIRA EM UM COMPÓSITO
CIMENTÍCIO SUSTENTÁVEL**

	Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito curricular para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil
--	---

Aprovado em 03 de julho de 2026

Banca Examinadora

Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos (Orientador - IFPB)

Dr. José Augusto Gomes Neto (Coorientador - UFPB);

Dra. Ana Cláudia Leão Borges (Examinadora Interna - IFPB)

Me. Severino Ferreira da Silva Filho (Examinador Externo)

JOÃO PESSOA

2026

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcos Alyssandro Soares dos Anjos**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/07/2026 21:13:44.
- **Ana Claudia Leao Borges**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/07/2026 13:30:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 901032
Verificador: 870b0e09a4
Código de Autenticação:



NOSSA MISSÃO: Ofertar a educação profissional, tecnológica e humanística em todos os seus níveis e modalidades por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, na perspectiva de contribuir na formação de cidadãos para atuarem no mundo do trabalho e na construção de uma sociedade inclusiva, justa, sustentável e democrática.

VALORES E PRINCÍPIOS: Ética, Desenvolvimento Humano, Inovação, Qualidade e Excelência, Transparência, Respeito, Compromisso Social e Ambiental.

Documento assinado digitalmente
JOSE AUGUSTO GOMES NETO
Data: 09/07/2026 09:45:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
SEVERINO FERREIRA DA SILVA FILHO
Data: 09/07/2026 11:01:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

*Dedico este trabalho à minha família, ao meu parceiro Bruno, e a mim, por não ter
desistido de correr atrás dos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, George e Andréa, e a minha irmã, Mariana, por acreditarem em mim, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida, por confiarem na minha capacidade e me motivar a continuar, quando, em tantos momentos, pensei em desistir.

Agradeço aos meus avós, Zeca e Rosa, por me incentivarem durante todos esses anos, por terem sido os primeiros na fila a comemorar as minhas conquistas, e por me apoiarem durante a minha graduação.

À vó Goretti, por me acolher durante toda a minha graduação, por me apoiar mesmo diante de tantas dificuldades, e mostrar-se como exemplo de resignação e coragem para enfrentar qualquer desafio.

Ao meu companheiro de vida, Bruno, por tornar a minha jornada menos solitária, por segurar a minha mão durante os momentos mais difíceis da minha vida, por mostrar que qualquer pequena conquista é digna de comemoração, por me mostrar que a vida consegue ser maravilhosa desde que se tenha amor.

Aos mestres e professores que me acompanharam durante a minha graduação, que compartilharam seu vasto conhecimento sem quaisquer orgulhos, pelos conselhos e experiências que transcenderam a sala de aula.

Ao mestre Severino Ferreira, pela imensurável contribuição com este trabalho, por ressignificar a palavra ‘professor’, por lembrar-me que, às vezes, é preciso fechar os olhos e respirar antes de prosseguir.

Aos meus orientadores, por acreditarem que eu seria capaz de desenvolver este trabalho, por confiarem no meu potencial, e por me auxiliarem durante todas as etapas.

Aos colegas de curso e amigos, Sebastião e Delby, e todo o pessoal do LABEME, Urbano e os técnicos da CBTU, por me estenderem a mão sem quaisquer ressalvas, sem vocês, este trabalho não estaria concluído.

Agradeço a mim, por nunca ter desistido, mesmo diante de tantas dificuldades, mesmo com saudades de casa, mesmo com medo. Você cresceu, e os seus sonhos também.

Se você deseja fazer uma torta de maçã do zero, primeiro você deve criar o universo.

— Carl Sagan

RESUMO

A indústria da construção é responsável pelo consumo de uma parcela significativa dos recursos naturais do planeta e é a maior geradora de resíduos sólidos mundialmente. Paralelamente, milhões de dormentes de madeira nativa nas ferrovias brasileiras são substituídos anualmente e são frequentemente descartados de forma inadequada. Esta prática acarreta riscos ambientais e à saúde pública, agravados pela escassez de literatura consolidada e a ausência de normas específicas para o uso e descarte adequado da madeira tratada na construção civil. Nesse contexto, este trabalho investiga o potencial de incorporação de resíduos de madeira tratada provenientes de dormentes descartados da Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), em João Pessoa, em compósito de base cimentícia, por meio da substituição parcial volumétrica da areia em um traço de argamassa. Foi utilizado CP II-F 40 e, como referência, um traço de argamassa 1:3, para a moldagem de 48 amostras com 5%, 10% e 15% de resíduo. Foram avaliadas as propriedades físico-mecânicas como a resistência à compressão axial e à tração na flexão, análise de consistência e trabalhabilidade, além de análise visual macro e microscópica das misturas. Com o estudo verificou-se queda progressiva da resistência dos compósitos contendo mais de 10% de resíduo, sendo T15 o traço que obteve menor desempenho físico-mecânico. Além disso, observou-se a queda gradual da densidade aparente com o incremento do teor de fibra, conforme esperado para compósitos cimento-madeira analisados na literatura. Por fim, constatou-se que a faixa ótima do teor de resíduo é $\leq 5\%$ (T5), conferindo aumento da resistência à compressão axial aos 7 dias em 1,28% e de 20,5% aos 28 dias, adicionalmente, a resistência à tração na flexão aumentou 6,4% e 5% aos 7 e 28 dias, respectivamente, em relação ao traço referência (T0). Os resultados sugerem que a incorporação destes resíduos em compósitos representa uma alternativa tecnicamente viável para o reaproveitamento destes passivos ferroviários. Entretanto, estudos complementares de lixiviação e avaliação ambiental são necessários para verificar a segurança do material ao longo de sua vida útil.

Palavras-chave: compósito cimento-madeira; argamassa; dormente; sustentabilidade; resíduos.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for the usage of a great percentage of world's natural resources, and it is the largest source of solid residues worldwide. Parallel to this, millions of wooden sleepers from native species are replaced yearly and are often improperly disposed of. That practice results in environmental and public health risks, aggravated by the lack of well-established literature or specific technical standards regarding the use and proper disposal of treated wood in the construction industry. On that matter, this research investigates the potential use of treated wood residues from discarded sleepers from Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), João Pessoa, in cement-based composite, through partial volumetric replacement of sand in a mortar mix. It was used CP II-F 40, and as reference, a 1:3 mortar mix, for moulding 48 specimens containing 5%, 10% and 15% of waste. The physical and mechanic proprieties were evaluated, like compressive and tensile strength, consistency and workability analysis, as well as macro and Microscopic visual analysis of the mixtures. With the study, it was possible to verify a progressive strength drop in mixes containing more than 10% waste, with the T15 exhibiting the lowest physical-mechanical performance. Furthermore, it was observed that there was a decrease in bulk density with the addition of fiber, as expected for cement-wood composites according to literature. In conclusion, it was found that the optimal waste content is $\leq 5\%$ (T5), resulting in a 1,28% increase in compressive strength at 7 days and a 20,5% increase at 28 days compared with the fiber-free mix (T0), in addition, the tensile strength increased by 6,4% and 5% at 7 and 28 days, respectively. The results suggest that the incorporation of these residues into composites is a technically feasible strategy for the valorization of railway waste. Nevertheless, further leaching and environmental assessment studies are necessary to verify the long-term safety of the material throughout its service life.

Key words: cement-wood composite; mortar; sleeper; sustainability; waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Elementos da via férrea.....	17
Figura 2 - Ferrovia para veículos de passageiros na CBTU	17
Figura 3 - Dormentes variados (concreto, madeira e plástico) em uma mesma linha	19
Figura 4 - Resíduos de dormentes de madeira tratada à margem da via férrea	20
Figura 5 - Resistência à Compressão média $\times$ TF na substituição parcial da areia por fibra ...	25
Figura 6 - Resistência média à Compressão $\times$ Pré-tratamentos da fibra	26
Figura 7 - Relação entre a o Teor de Fibra e a Absorção de Água e Vazios do compósito.....	26
Figura 8 - Coleta dos dormentes na CBTU.....	28
Figura 9 - Transporte e chegada dos dormentes ao LABEME	28
Figura 10 - Dormentes triturados e acondicionados em tonéis, no LABEME	29
Figura 11 - Partículas peneiradas com peneira de 2,36 mm	29
Figura 12 - Lavagem do particulado na autoclave universal	30
Figura 13 - Autoclave universal, marca Fabbe Primar Industrial Ltda.....	30
Figura 14 - Resíduo pós-tratamento e antes da secagem em estufa.....	31
Figura 15 - Coloração da água da lavagem do resíduo.....	31
Figura 16 - Areia retida em cada uma das peneiras após ensaio.....	33
Figura 17 - Curva Granulométrica da areia	34
Figura 18 - Partículas retidas em cada uma das peneiras após ensaio	36
Figura 19 - Curva Granulométrica do resíduo de madeira	36
Figura 20 - Moldes cilíndrico e prismático, respectivamente	39
Figura 21 - Argamassadeira	39
Figura 22 - Balanças de precisão	39
Figura 23 - Cuba, soquete metálico, espátula e paquímetro, respectivamente	40
Figura 24 - Corpos de prova cilíndricos (T10 e T5) pós-moldagem	40
Figura 25 - Mesa de Consistência	41
Figura 26 - Aferição dos diâmetros com o paquímetro.....	41
Figura 27 - Diâmetros aferidos para obtenção do Índice de Consistência de T0.....	42
Figura 28 - Índice de Consistência (mm) por traço	43
Figura 29 - Ensaio de Resistência à Compressão, prensa da marca Solotest.....	44
Figura 30 - Corpos-de-prova pós-ensaio de resistência à compressão aos 7 dias.....	44
Figura 31 - Corpos-de-prova pós-ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.....	45
Figura 32 - Resistência Média à Compressão por traço aos 7 e 28 dias de idade.....	46

Figura 33 - Ensaio de Resistência à Tração na Flexão aos 7 dias (T0).....	48
Figura 34 - Ensaio de Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias (T15)	48
Figura 35 - Distância entre os suportes (L).....	49
Figura 36 - Resistência Média à Tração por traço aos 7 e 28 dias de idade	50
Figura 37- Medição das dimensões dos corpos-de-prova.....	52
Figura 38 - Pesagem dos corpos-de-prova.....	52
Figura 39 - Densidade Aparente média das amostras cilíndricas e prismáticas	52
Figura 40 - Corpos-de-prova dos traços T0, T5, T10 e T15, respectivamente	53
Figura 41 - Microscópio Digital USB 1600x.....	54
Figura 42 - Microscopia das amostras de T0, T5, T10 e T15, respectivamente	54
Figura 43 - Fibra vegetal em um corpo-de-prova (T15).....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ferrovias de passageiros brasileiras.....	18
Tabela 2 - Avaliação comparativa entre diversos materiais utilizados para fabricação de dormentes.....	19
Tabela 3 - Estudos sobre CMCs com fibras de madeira.....	24
Tabela 4 - Compatibilidade entre o Cimento Portland e fibras vegetais em diferentes estudos	27
Tabela 5 - Resultados obtidos no ensaio para determinação da Massa Unitária da Areia.....	33
Tabela 6 - Resultados obtidos com o ensaio de determinação granulométrica.....	33
Tabela 7 - Resultados obtidos no ensaio para determinação da Massa Unitária das partículas	35
Tabela 8 - Resultados obtidos com o ensaio de determinação granulométrica.....	36
Tabela 9 - Quantidade de materiais (g) para 6 moldagens em corpos de prova cilíndricos.....	38
Tabela 10 - Quantidade de materiais (g) para 6 moldagens em corpos de prova prismáticos .	38
Tabela 11 - Índice de Consistência por traço.....	42
Tabela 12 - Resistência à Compressão Axial aos 7 e 28 dias (MPa).....	45
Tabela 13 - Resistência à Tração na Flexão aos 7 e 28 dias (MPa).....	49
Tabela 14 - Características dos Corpos-de-Prova Cilíndricos	64
Tabela 15 - Características dos Corpos-de-Prova Prismáticos	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCA	Arseniato de Cobre Cromatado
CCB	Borato de Cobre Cromatado
CBTU	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
CMC	Compósito Cimento Madeira
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CR	Creosoto
DA	Desvio Absoluto Máximo
DMC	Dimensão Máxima Característica
DMLCR	Madeira Laminada Colada Reciclada
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
ETM	Especificação Técnicas de Materiais e Serviços Ferroviários
GEE	Gás do Efeito Estufa
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MF	Módulo de Finura
SD	Desvio Padrão
T0	Traço Referência ou Traço sem resíduo
T5	Traço com 5% de resíduo
T10	Traço com 10% de resíduo
T15	Traço com 15% de resíduo
TF	Teor de Fibra
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UM	Massa Unitária
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CADRI	Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental
CDF	Certificado de Destinação Final

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos.....	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	Superestrutura Ferroviária: dormentes de madeira, características e vida útil.....	17
3.1.1	Dormentes de madeira tratada	21
3.2	Caracterização dos resíduos de dormentes de madeira tratada e implicações em compósitos cimentícios	23
3.3	Análise comparativa do desempenho físico e mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras lignocelulósicas e a compatibilidade cimento-madeira.....	25
4	METODOLOGIA.....	28
4.1	Coleta dos dormentes e pré-tratamentos	28
4.2	Caracterização dos materiais.....	32
4.2.1	Cimento Portland CP II-F-40.....	32
4.2.2	Areia.....	32
4.2.3	Resíduo de madeira dos dormentes.....	34
4.3	Dosagem dos traços e moldagem dos corpos de prova.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1	Índices de Consistência por traço	41
5.2	Resistência à Compressão Axial aos 7 e 28 dias de idade	44
5.3	Resistência à Tração na Flexão aos 7 e 28 dias de idade.....	48
5.4	Caracterização das amostras	51
5.4.1	Densidade Aparente por traço.....	51
5.4.2	Análise visual e porosidade	53
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – Caracterização das amostras.....	64

1 INTRODUÇÃO

A busca por materiais e técnicas de construção sustentáveis e economicamente viáveis tem se intensificado nos últimos anos, em razão do aumento de crises ambientais, escassez de recursos naturais, pressões econômicas e sociais. Além disso, os consumidores têm adotado uma postura mais criteriosa em relação ao impacto ambiental envolvido no processo produtivo dos bens que consomem, contribuindo para a adoção de um controle de qualidade cada vez mais rigoroso ao transformar a sustentabilidade em um critério de compra, o que têm pressionado as empresas a adotarem padrões técnicos elevados e processos de verificação transparentes para validar suas práticas e produtos (Vidal *et al.*, 2015; Salles, 2009; Martins Filho & Martins, 2016).

Frente a isso, sob diretrizes e metas estabelecidas por compromissos globais de desenvolvimento, como o Protocolo de Kyoto, o controle da emissão de gases do efeito estufa (GEEs) recai diretamente sobre o setor construtivo, uma vez que a indústria da construção civil é responsável por aproximadamente 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) (Kilbert, 2013 *apud* Castro, 2021).

De acordo com um estudo publicado na revista científica *Nature Communications* (Shah *et al.*, 2022), o uso de materiais substitutos ao cimento pode reduzir drasticamente a emissão de CO₂ anual em, aproximadamente, 1,3 bilhões de toneladas, reforçando a necessidade de estimular pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais de construção alternativos e ecoeficientes, além de efetivamente adotá-los na realidade construtiva brasileira.

Paralelamente, a malha ferroviária brasileira, em seus 30 mil quilômetros de extensão, utiliza cerca de 60 a 100 milhões de dormentes, dos quais cerca de 90% eram constituídos de madeira de lei (Alencar, 2004; Salles, 2009), que vêm apresentando uma tendência de declínio gradual, motivada pela redução da oferta de madeira nativa em razão de restrições ambientais rigorosas (Icimoto, 2018).

Uma vez que a substituição de dormentes de madeira por materiais como aço, concreto e polímeros reciclados, tornou-se uma escolha mais ambientalmente consciente por parte das companhias ferroviárias, o descarte inadequado dos dormentes anteriores tem se tornado uma preocupação ambiental devido ao depósito de resíduos existentes nos preservativos da madeira, cujos compostos químicos tornam-se passivos ambientais quando em processo de lixiviação, contaminando cursos d'água e até de lençóis freáticos pelo escoamento do excesso de preservativo, podendo provocar mudanças no comportamento da fauna e a possibilidade de extinção de espécies.

Além disso, no meio antrópico, a absorção, inalação e até ingestão dos produtos por parte dos funcionários, acarreta riscos à saúde (Hoerlle & Brehm, 2016; Salles, 2009; Ferrarini, *et al.*, 2015).

Nesse aspecto, a engenharia ferroviária contemporânea enfrenta um "desafio triádico" que exige soluções tecnicamente robustas e integradas: o gerenciamento de volumes críticos de resíduos sólidos oriundos do acondicionamento ou descarte impróprio dos elementos ferroviários, a contenção do desmatamento e o combate ao aquecimento global.

Diante desse cenário, o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos como a madeira proveniente de dormentes ferroviários, apresenta-se como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis, e evitando que estes passivos sejam descartados de forma inadequada após o fim da sua vida útil. Neste contexto, diversas pesquisas têm investigado a incorporação de partículas de madeira em matrizes cimentícias, visando avaliar suas propriedades e sua viabilidade como material para aplicações não estruturais, como elementos de vedação (Ashori *et al.*, 2012; Hansted *et al.*, 2021; Gloria *et al.*, 2020; Leite *et al.*, 2025)

Nesta perspectiva, este trabalho investiga o potencial de aproveitamento de resíduos de madeira de dormentes em um compósito cimentício — através da realização de ensaios laboratoriais e levantamento de estudos correlatos — em concentrações de 5%, 10% e 15% de fibra em substituição parcial do volume da areia, tendo como referência uma argamassa 1:3 (cimento:areia), adotando-se uma relação a/c fixa de 0,50, visando compensar a natureza higroscópica da madeira e manter a comparabilidade entre os traços.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aplicação de bio-compósitos com resíduo de madeira de dormentes em elementos construtivos não estruturais, considerando suas propriedades físicas, mecânicas e limitações ambientais.

2.2 Objetivos Específicos

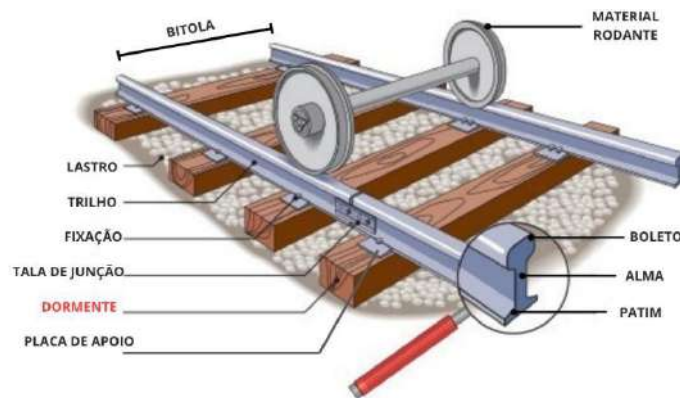
- i. Confeccionar 3 misturas (T5, T10 e T15) de bio-compósitos com resíduo de dormente de madeira tratada;
- ii. Avaliar o desempenho físico e mecânico do material produzido a partir de ensaios laboratoriais;
- iii. Realizar um levantamento bibliográfico de estudos correlatos, a fim de comparar os dados com os resultados obtidos neste trabalho.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Superestrutura Ferroviária: dormentes de madeira, características e vida útil

Os dormentes são elementos fundamentais da superestrutura ferroviária, responsáveis por absorver os esforços gerados pelos veículos ferroviários e distribuí-los ao lastro, de forma equivalente e sem apresentar deformações. Sua função principal é preservar a estabilidade geométrica dos trilhos – incluindo parâmetros de afastamento (bitola), inclinação e nivelamento longitudinal e transversal – para que seja garantida a segurança operacional e o conforto dos usuários (Brina, 1983).

Figura 1 - Elementos da via férrea



Fonte: adaptado de Baxter [s.d.]

Figura 2 - Ferrovia para veículos de passageiros na CBTU



Fonte: autora (2026)

Atualmente, diferentes materiais podem constituir os dormentes, como plástico, aço, concreto e a madeira, este último permanece sendo o material tradicionalmente mais utilizado para a fabricação de dormentes (Cunha, 2013).

Tabela 1 - Ferrovias de passageiros brasileiras

	Ferrovia	Empresa e Estado/Região	Matéria-prima	Malha (km)	Unidades
1	CBTU - Companhia Brasileira de Trens Urbanos	RJ, SP, RS, MG, PE, PB, BA, CE, AL, RN, DF e PI (capitais)	Madeira natural (em substituição por concreto)	206	343.402
2	Ramais: Guarapirim e Niterói	Cia Estadual de Engenharia de Transportes e Logística CENTRAL - RJ	(Sem informações)	92	153.364
3	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos	CPTM - SP	(Sem informações)	253	421.751
4	Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre	TRENSURB - RS	Maioria de concreto	34	56.678
5	Estrada de Ferro de Campos do Jordão	EFCJ - Pindamonhagaba e Campos do Jordão (SP)	Maioria de madeira natural	47	78.349
6	Estrada de Ferro da Mineração Rio Norte	EFMRN	(Sem informações)	35	58.345
7	Ramais: Deodoro, Japeri, Santa Cruz, Leopoldina (Saracuruna), Belford Roxo e Vila Inhomirim	Supervia - RJ	Maioria de madeira e concreto	225	375.075
Total de km e unidades de dormentes nas ferrovias de passageiros				892	1.486.964

Fonte: adaptado de Salles (2009)

Isso se deve à uma série de vantagens da madeira em comparação aos outros materiais, como o baixo consumo energético no processamento e baixos custos de produção, transporte e instalação reduzidos, bom isolamento térmico e trabalhabilidade (Vidal *et al.*, 2015), além de apresentar todas as propriedades mecânicas essenciais em um dormente, como a alta capacidade de absorção à impactos, amortecimento de vibrações, resistência e rigidez, boa fixação dos trilhos e isolamento elétrico adequado entre eles.

Tabela 2 - Avaliação comparativa entre diversos materiais utilizados para fabricação de dormentes

Características	Material			
	Madeira	Aço	Concreto	Plástico
	Elevado módulo de elasticidade e grande flexibilidade	Média estabilidade	Alta durabilidade e baixa estabilidade	Alta leveza
Custo de aquisição	Baixo	Alto	Alto	Alto
Durabilidade	Média (15 anos)	Alta (50 anos)	Alta	Alta
Reutilização	Sim	Sim	Não	Sim
Necessidade de tratamento preservativo preventivo	Sim	Não	Não	Não
Resistência a descarrilamentos	Alta	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: adaptado de Alves & Sinay (2005)

No registro abaixo, verifica-se o uso simultâneo de três tipos de dormentes: dormente de madeira, dormente de concreto convencional e o dormente polimérico.

Figura 3 - Dormentes variados (concreto, madeira e plástico) em uma mesma linha



Fonte: autora (2025)

Segundo o técnico Urbano, responsável pela administração da via, os dormentes de madeira registrados não detêm função mecânica plena na via, servindo apenas como “fixação extra”, sem impacto direto na resistência aos esforços submetidos à ferrovia.

No Brasil, os primeiros dormentes de madeira foram usados na Estrada de Ferro Madeira-Mamoré, em 1907 – preferencialmente os dormentes de madeira nobre, como maçaranduba, aroeira, ipê e jacarandá (Alencar, 2004; Damasceno *et al.*, 2017). Já em 1985, com a construção da Estrada de Ferro Carajás (EFC), utilizaram-se árvores nativas da Floresta Amazônica, como o Jatobá (*Hymenaea courbaril*) e o Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*) para a confecção de dormentes.

Atualmente, com a legislação ambiental cada vez mais restritiva e a escassez dessas espécies, a transição para materiais alternativos à madeira nativa representa, além de uma escolha ética, uma necessidade estratégica fundamental.

No contexto brasileiro, a gravidade da crise ambiental é evidenciada pelos dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que apontam o desmatamento de 572.766 km² na Amazônia Legal entre 1977 e 2005 – equivalente à, aproximadamente, 11% da sua extensão total.

Nesse contexto, o uso de espécies de eucalipto como *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus paniculata* e *Eucalyptus tereticornis* para a produção de dormentes tem sido aceita. Entretanto, essas espécies são consideradas madeiras moles e estão sujeitas ao ataque de microrganismos e insetos xilófagos requerendo tratamentos à base de óleo ou substâncias hidrossolúveis para preservar a estrutura morfológica da madeira. Essa medida garante a resistência mecânica necessária ao elemento ferroviário para o transporte de carga na ferrovia.

Apesar disso, dormentes de madeira possuem uma durabilidade consideravelmente menor em comparação aos outros materiais, e têm de ser substituídos conforme o fim da sua vida útil, gerando uma quantidade expressiva de resíduos sólidos que, muitas vezes, encontram-se às margens da linha férrea amontoados em pilhas, sem prazo definido para o seu recolhimento e entrega na Central de Materiais Descartados (CMD).

Essa realidade se verifica em diversas regiões do país, a exemplo do registrado abaixo na Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) em João Pessoa, Paraíba.

Figura 4 - Resíduos de dormentes de madeira tratada à margem da via férrea



Fonte: autora (2025)

3.1.1 Dormentes de madeira tratada

O uso de preservativos melhora exponencialmente a durabilidade da madeira, sua resistência às intempéries e à organismos xilófagos, consequentemente, aumentando a vida útil do material.

No Brasil, os preservativos mais utilizados na conservação de dormentes são os hidrossolúveis, como arseniato de Cobre cromatado (CCA) e borato de cobre cromatado (CCB); E os oleossolúveis como o creosoto (CR) (Alencar, 2004; Santos *et al.*, 2022).

Estes produtos, especialmente os hidrossolúveis, possuem compostos químicos sujeitos ao processo de lixiviação, acarretando riscos de contaminação do solo e de corpos d'água, representando, também, ameaças à saúde da população e dos próprios operadores ferroviários (Ohgami *et al.*, 2015).

Conforme a classificação de resíduos sólidos na Resolução nº 307/02 do CONAMA, resíduos de madeira tratada podem ser enquadrados como perigosos, e tratados como Classe D — resíduos de caráter tóxico ou danoso.

Complementarmente, a ABNT NBR 10004-2:2024 classifica como resíduos perigosos materiais de madeira contendo substâncias ou propriedades que conferem periculosidade, incluindo resíduos associados a processos de preservação da madeira.

Ou seja, os dormentes ferroviários, que tipicamente são impregnados com creosoto ou CCA, enquadram-se na listagem de resíduos perigosos, devido à presença de substâncias químicas nocivas como arsênio e HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos).

A Lei nº 4.797/1965, torna obrigatório o uso de madeiras preservadas tratadas com substâncias químicas em serviços de utilidade pública, como transporte ferroviário e rodoviário, serviços telefônicos e de fornecimento de eletricidade.

O tratamento é geralmente realizado pelo processo de autoclave sob vácuo e pressão, garantindo que o produto penetre profundamente nas camadas da madeira para prolongar sua vida útil, especialmente em espécies de reflorestamento como o eucalipto, que possuem menor durabilidade natural em comparação com as madeiras de lei (Damasceno *et al.*, 2017).

Tendo em vista que boa parte das ferrovias brasileiras ainda utilizam dormentes fabricados de madeira tratada, somada à escassez de um procedimento nacional único, específico e plenamente consolidado para a coleta e destinação desses dormentes, verificam-se práticas de descarte e acondicionamento precárias de dormentes inoperantes. Entre essas práticas, a queima de dormentes — frequente em fazendas que adquirem esses materiais de ferrovias ou sucateiros —, que configura como prática ilegal e crime ambiental, gera HPAs e

dioxinas na fumaça, compostos cronicamente tóxicos e potencialmente cancerígenos (Salles, 2009). A comercialização de dormentes tratados usados pode ser considerada irregular ou ilegal quando ocorre em desacordo com as restrições ambientais e sanitárias aplicáveis.

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, IBAMA e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB, já autuaram ferrovias que comercializavam irregularmente dormentes usados.

O aterro Classe I desses contaminantes é uma rota segura e aceita universalmente, pois a impermeabilização das células e o tratamento do percolado, impede que o arsênio e o PAH entrem em contato com o solo e aquíferos, entretanto exige um Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental (CADRI), emitido pela CETESB, com Laudo de Caracterização de Resíduos (LCR), Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) no Sistema Estadual de Gerenciamento Online de Resíduos Sólidos (SIGOR) e Certificado de Destinação Final (CDF). No caso das companhias ferroviárias, pode se tornar uma alternativa dispendiosa devido ao grande volume de resíduo — o custo de aterro para madeira CCA fica entre R\$ 800 e R\$ 1.800/t (CETESB, 2024; Seven Resíduos, 2026).

Em 2013, o custo de destinação dessas peças para um aterro industrial ou para incineração era de R\$ 1.012,89 por tonelada (VALE S.A., 2013). O gasto anual seria de R\$ 11 milhões para incinerar 11.000 toneladas de dormentes inservíveis até 2018 (Damasceno *et al.*, 2017).

Essa realidade evidencia a necessidade de reuso desse material em outras aplicações após o fim da sua vida útil como elemento ferroviário.

As práticas mais comuns de reaproveitamento envolvem aplicações em elementos não-estruturais ou com baixa solicitação de esforços, como o uso em decoração e paisagismo — na fabricação de móveis, pergolados, jardins verticais e decks — além de aplicações funcionais em muros de contenção, mourões de cercas e estruturas de outdoors (Nolasco & Silva, 2023), aplicações que, em geral, não ofereçam risco de contaminar o meio ou os usuários.

Conforme Romagnano e Brazolin (2005), a reciclagem de madeira tratada em novos produtos está sendo explorada em diversos países. De maneira ideal, deve-se primeiramente remover os contaminantes da madeira para tornar as fibras limpas e possibilitar a reutilização segura, mas existem alternativas para seu uso sem a necessidade de remoção desses elementos. Algumas destas novas tecnologias incluem o uso de partículas de madeira tratada como compósitos madeira-madeira, madeira-cimento (CMCs) e madeira-plástico.

Nesse contexto, o encapsulamento desses resíduos em matrizes cimentícias pode proporcionar uma disposição final segura e produtiva da madeira tratada (Amiandamhen & Izeke, 2013; Damas, 2024; Hoerlle & Brehm, 2016).

3.2 Caracterização dos resíduos de dormentes de madeira tratada e implicações em compósitos cimentícios

Um material compósito é definido como qualquer material multifásico formado pela combinação de dois ou mais materiais distintos que, quando unidos, resultam em um novo material com propriedades superiores às de seus componentes (Icimoto, 2018).

A estrutura de um compósito é formada por duas fases distintas (Damas, 2024):

- **Fase Matriz:** fase contínua que envolve e protege a Fase Dispersa ou Reforço, transmite e homogeneiza os esforços suportados pelos elementos de reforço. É a interface crítica que confere a estrutura ao material compósito.
- **Fase Dispersa ou Reforço:** é a fase envolvida pela Matriz, geralmente composta por fibras ou partículas. É a fase responsável por conferir rigidez, resistência mecânica ao material; além disso, é a orientação desses elementos – especialmente das fibras – que determina o comportamento anisotrópico do compósito.

Os compósitos apresentam vantagens relevantes frente a outros materiais construtivos, como boa relação peso/resistência, trabalhabilidade e menor custo operacional. Suas propriedades permitem produzir elementos esbeltos com bom desempenho termoacústico e mecânico (Beraldo *et al.*, 1998; Weber, 2017), além de possibilitar painéis com massa específica inferior à das placas cimentícias tradicionais, otimizando transporte e montagem (Villas-Bôas *et al.*, 2017).

A despeito da escolha da fibra incorporada nos compósitos, questões ambientais tornaram-se cada vez mais relevantes, tendo em vista que fibras sintéticas como as de carbono e vidro não são facilmente biodegradáveis, têm alto custo de material e de processamento, que requer um consumo elevado de energia. Para tal, Barros *et al.* (2023) afirmam que o uso de fibras naturais, como coco, açaí, sisal e bambu, é considerado uma alternativa, principalmente por serem materiais leves, renováveis e biodegradáveis, de baixo custo e consumo de energia.

Diante disso, o desenvolvimento de compósitos de cimento-madeira (CMCs) — materiais constituídos de Cimento Portland como aglomerante, onde agregado costuma ser substituído, parcial ou totalmente, por material orgânico fragmentado, como particulado, serragem ou farinha de madeira (Frybort *et al.*, 2008) — incorporando fibras obtidas pela coleta de resíduos de madeiras e serrarias, ou, ainda, de dormentes ferroviários descartados, vem tomando destaque em pesquisas mais recentes (Tabela 3).

Tabela 3 - Estudos sobre CMCs com fibras de madeira

Fonte	Fibra	Propriedades avaliadas
1	<i>Pinus elliottii</i> (Serragem)	Resistência à compressão; Rigidez; MOE; Tempo de pega; Densidade e absorção de água
2	<i>Pinus spp.</i> (Farinha)	Densidade; Absorção de água; Inchamento; Resistência à tração e à compressão; MOE; MOR e condutividade
3	Espécies da Amazônia (partículas variadas)	Resistência à compressão e flexão; Condutividade; Absorção e isolamento sonoro
4	<i>Hymenolobium Petraeum</i> , <i>Eucalyptus spp.</i> e <i>Pinus spp.</i> (partículas variadas)	Resistência à compressão; MOE e densidade
5	<i>Pinus Elliottii</i> e <i>Eucalyptus Grandis.</i> (serragem)	Densidade; Absorção de água; Porosidade; Inchamento; Resistência à compressão e tração na flexão; MOE e MOR

(1) Garcez *et al.* (2016); (2) Damas (2024); (3) Ribeiro (2016); (4) Macêdo et al (2011); (5) Silva et al (2021).

Fonte: autora (2026)

A seleção de fontes e espécies de madeira é crucial na produção de CMCs, considerando que as características físico-químicas e o teor de extrativos orgânicos (como açúcares, taninos e ácidos) variam significativamente entre as espécies, afetando diretamente a hidratação do cimento e a durabilidade do compósito (Garcez *et al.*, 2016).

O bambu, por exemplo, representa uma ótima alternativa às espécies de madeira tradicionalmente utilizadas, elevando o caráter sustentável do material compósito (Barros *et al.*, 2023; Gloria *et al.*, 2020). Adicionalmente, ao incorporar fontes de madeira reciclada, como resíduos ou madeira de reflorestamento, pode-se reduzir a dependência no uso de madeira nativa e reduzir o impacto ambiental (Nolasco & Silva, 2023).

Entretanto, a heterogeneidade nas propriedades da madeira reciclada exige uma seleção e processamento minuciosos para garantir a qualidade do produto, além de tratamentos prévios de lavagem para remover componentes inibidores e assegurar a qualidade final do compósito (Icimoto, 2018; Garcez *et al.*, 2016; Gloria *et al.*, 2020).

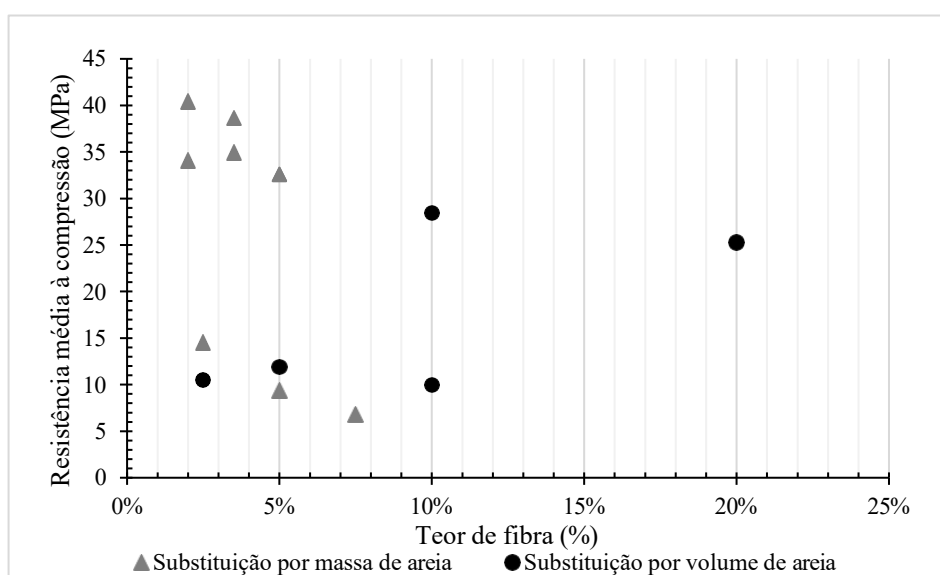
Madeiras do gênero *Pinus spp.* são frequentemente citadas como tendo baixa inibição e boa compatibilidade natural, enquanto espécies de eucalipto e madeiras tropicais apresentam variações significativas, muitas vezes exigindo tratamentos prévios para viabilizar o uso (Damas, 2024).

3.3 Análise comparativa do desempenho físico e mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras lignocelulósicas e a compatibilidade cimento-madeira

Os estudos analisados reforçam a variedade nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos com inserção de fibras vegetais, observa-se que o aumento do Teor de Fibra (TF) resulta em uma redução da resistência à compressão (Damas, 2024; Garcez *et al.*, 2016; Ribeiro, 2016; Macêdo *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2021) na maioria dos casos.

No que se refere aos estudos onde a fibra foi incorporada como substituição parcial do agregado miúdo no traço — tanto em massa quanto em volume — foram levantados os resultados obtidos nos ensaios de compressão aos 28 dias de pesquisas realizadas por Garcez *et al.* (2016), Macêdo *et al.* (2011), Ribeiro (2016) e Silva *et al.* (2021). Essa abordagem permitiu avaliar a influência da proporção de fibra no desempenho mecânico final dos compósitos produzidos (figura 5).

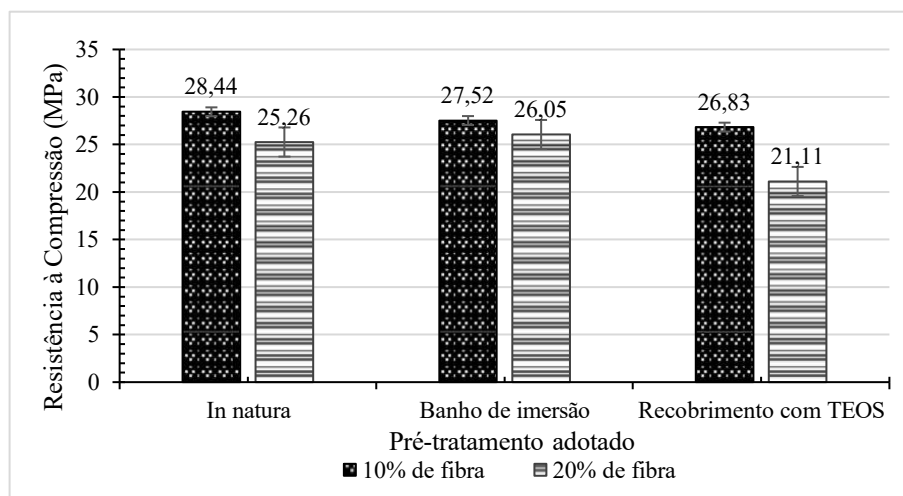
Figura 5 - Resistência à Compressão média $\times$ TF na substituição parcial da areia por fibra



Fonte: autora (2026)

Tendo em vista a heterogeneidade das fibras no que se refere à natureza química da espécie vegetal, o formato das partículas e a origem, a previsibilidade de comportamento do compósito permanece amplamente experimental (Castro, 2021; Garcez *et al.*, 2016), frequentemente apresentando propriedades físicas e mecânicas diferentes.

Figura 6 - Resistência média à Compressão × Pré-tratamentos da fibra

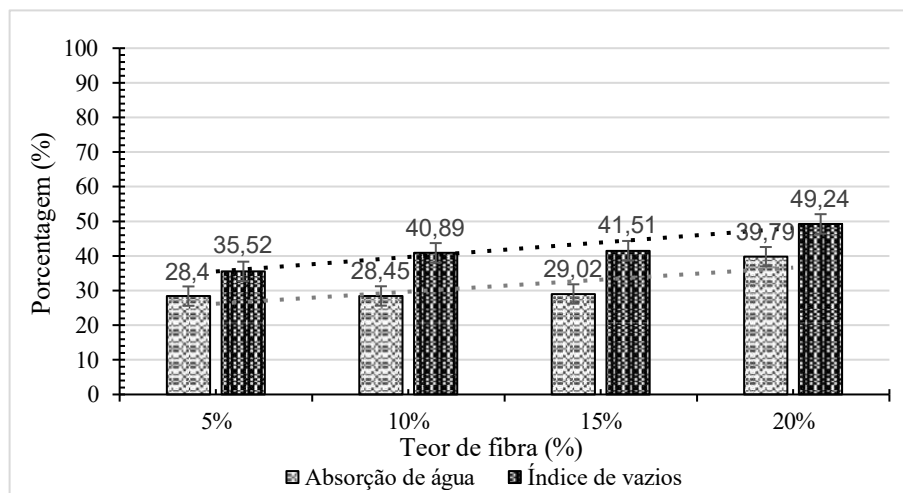


Fonte: autora (2026)

Na figura 6 nota-se que a resistência à compressão de compósitos com incorporação de 10% de fibra apresentou variação em um mesmo estudo (Garcez *et al.*, 2016), com valores entre 28,44 e 26,83 MPa, isso se deve a aplicação de pré-tratamentos diferentes nas partículas de madeira, reforçando que a eficácia dos pré-tratamentos na fibra não é universal e pode impactar negativamente na resistência do material (Castro, 2021; Damas, 2024).

Com relação às propriedades físicas, verificou-se aumento da absorção de água e da porosidade com o acréscimo do teor de fibra, bem como uma redução significativa na densidade do material, ou seja — materiais mais leves do que o concreto tradicional, mas consideravelmente menos resistentes. Esse comportamento está associado à natureza higroscópica e macroporosa do material lignocelulósico (Castro, 2021; Garcez *et al.*, 2016) especialmente em composições com teores superiores a 10%.

Figura 7 - Relação entre a o Teor de Fibra e a Absorção de Água e Vazios do compósito



Fonte: autora (2026)

No que tange os aglomerantes, o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) é o mais recomendado em pesquisas, pois seu elevado teor de C_3S e C_3A , e o alto calor de hidratação ajudam a superar o efeito retardador dos componentes vegetais (Damas, 2024; Gloria *et al.*, 2020). Por outro lado, tipos de cimento com hidratação mais lenta, como o CP IV (Pozolânico) e o CP III (de Alto-Forno), tendem a apresentar menor desempenho ou até falha total na cura quando combinados com partículas lignocelulósicas.

Tabela 4 - Compatibilidade entre o Cimento Portland e fibras vegetais em diferentes estudos

Fonte	Cimento Portland	Fibra	Compatibilidade
1	CPV-ARI	Pinus elliottii (Serragem)	A compatibilidade aumenta com o pré-tratamento: in natura (menor), térmico (intermediário) e TEOS (maior), conforme redução do TPI e TPF.
2	CPV-ARI	Pinus spp. (Farinha)	Redução gradativa da compatibilidade conforme o aumento do TF
3	CP IV-32	Serragem (misto)	A incompatibilidade cimento-madeira permanece nas condições analisadas. A adição de metacaulinita (10%) e Ca (OH) ₂ (5%) foi eficaz em restabelecer a resistência inicial, indicando melhora da compatibilidade
4	CP I	Hymenolobium Petraeum, Eucalyptus spp. e Pinus spp. (partículas variadas)	O uso de aditivo acelerador de pega melhorou a compatibilidade cimento-madeira, evidenciado pela recuperação da resistência mecânica e significativa redução do tempo de desmoldagem.
	CP II-Z		
5	CP II-Z	Pinus Elliottii e Eucalyptus Grandis. (serragem)	Granulometria de 2,36 mm favoreceu a compatibilidade, melhorando a integração matriz-fibra e reduzindo a absorção de água.

(1) Garcez *et al.* (2016); (2) Damas (2024); (3) Ribeiro (2016); (4) Macêdo et al (2011); (5) Silva et al (2021).

Fonte: autora (2026).

4 METODOLOGIA

As amostras desenvolvidas foram caracterizadas física e mecanicamente através de ensaios laboratoriais descritos nas seções 4 e 5 deste trabalho.

Ademais, foram revisados dados obtidos em estudos correlatos para fins de comparação. A busca foi realizada em bases de dados científicas como o *Research Gate*, CAPES e *Science Direct*, por meio de palavras-chave relacionadas a compósitos cimentícios com adição de fibras vegetais. Foram definidos critérios de inclusão e exclusão para a seleção dos estudos considerando a relevância temática, sendo priorizados àqueles com dados experimentais reportados na literatura, cujas informações subsidiaram a construção do referencial teórico e a discussão, bem como as conclusões do presente trabalho. Tratando-se, portanto, de uma pesquisa de natureza quantitativa, de caráter experimental e comparativo.

4.1 Coleta dos dormentes e pré-tratamentos

Foram cedidos 3 dormentes inoperantes na sede da CBTU, estes foram coletados e transferidos até o Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME), na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), onde foi realizado o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 8 - Coleta dos dormentes na CBTU



Fonte: autora (2026)

Figura 9 - Transporte e chegada dos dormentes ao LABEME



Fonte: autora (2026)

Após a limpeza superficial, retirada de parafusos e placas metálicas remanescentes dos dormentes, foi realizada a trituração do material por meio de um Triturador de Galhos de Podas, a fim de tornar o material adequado para o uso em forma de partículas para posterior substituição parcial da areia nos traços de argamassa desenvolvidos.

Figura 10 - Dormentes triturados e acondicionados em tonéis, no LABEME



Fonte: autora (2026)

Tendo em vista a variância do tamanho e formato das partículas após a trituração inicial, foi realizada uma pré-seleção da granulometria do resíduo por peneiração manual com malhas de 4,75 e 2,36 mm, adotado o material passante nesta última. Essa etapa teve como objetivo remover partículas grosseiras oriundas de fragmentos menos triturados ou de seções mais resistentes do dormente, permitindo que o ensaio granulométrico subsequente focasse na fração fina do resíduo — que representa o material de maior interesse para as aplicações previstas neste estudo.

Figura 11 - Partículas peneiradas com peneira de 2,36 mm



Fonte: autora (2026)

Em estudos e pesquisas correlatos verificou-se que para compósitos onde se busca maior resistência à compressão axial, sugere-se o uso de partículas menores (frequentemente na faixa de 2,36 mm a 4,75 mm), e partículas maiores e mais longas (tipo *flakes* ou *chips*) para melhores resultados de resistência à tração na flexão (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) (Villas-Bôas *et al.*, 2017; Amiandamhen & Izekor, 2013; Matoski & Iwakiri, 2007).

Para otimizar a interface cimento-madeira, a literatura sugere o uso de aditivos químicos, como o cloreto de cálcio ($CaCl_2$), ou pré-tratamentos de lavagem em água quente ou fria (Beraldo *et al.*, 1998; Amiandamhen & Izekor, 2013; Damas, 2024; Gloria *et al.*, 2020).

Nessa perspectiva, foi realizada uma lavagem a quente como pré-tratamento do resíduo, visando minimizar a inibição da pega do cimento causada por açúcares e compostos hidrossolúveis da madeira. O material foi imerso em água a 80°C durante 1 hora em uma autoclave universal adaptada (Figura 12), para que não ocorresse o vazamento do material pelos orifícios do equipamento.

Figura 12 - Lavagem do particulado na autoclave universal



Fonte: autora (2026)

Figura 13 - Autoclave universal, marca Fabbe Primar Industrial Ltda.



Fonte: autora (2026)

O material úmido foi retirado e colocado em uma estufa, com temperatura controlada a 60°C, por 24 horas. Os resíduos secos foram acondicionados no laboratório, longe de umidade e protegidos contra intempéries até o início das moldagens dos corpos-de-prova.

Figura 14 - Resíduo pós-tratamento e antes da secagem em estufa



Fonte: autora (2026)

Figura 15 - Coloração da água da lavagem do resíduo



Fonte: autora (2026)

Ressalta-se que, considerando os baixos teores de substituição do agregado miúdo (5%, 10% e 15%), a lavagem em água quente associada à secagem controlada foi considerada suficiente para garantir compatibilidade adequada entre a madeira e a matriz cimentícia. Adicionalmente, a matriz de cimento Portland pode atuar como meio de imobilização dos metais presentes no tratamento da madeira com preservativos químicos (CCA e Creosoto) (Amiandamhen & Izekor, 2013; Damas, 2024; Romagnano & Brazolin, 2005).

4.2 Caracterização dos materiais

4.2.1 Cimento Portland CP II-F-40

Conforme o indicado na literatura levantada quanto a compatibilidade cimento-madeira entre diversos tipos de Cimento Portland e fibras vegetais, optou-se por utilizar o Cimento Portland composto por material carbonático, de alta resistência CP II-F-40, caracterizado pela baixa demanda de água no concreto e boa compatibilidade com aditivos.

4.2.2 Areia

4.2.2.1 Determinação da Massa Específica

O agregado miúdo utilizado para composição de todos os traços de argamassa foi uma areia fina (MF = 1,85). Foi verificada a massa específica através por meio do frasco Chapman, conforme a ABNT NBR 9776:1987.

Foi inserida a água no frasco até a marca de 200 cm³ e utilizando 500 g de areia, agitando o recipiente até a eliminação total das bolhas de ar. A massa específica foi obtida mediante a expressão:

Equação 1
$$\gamma = \frac{500}{\text{Leitura} - 200}$$

Foi obtida a massa específica (γ) de 2,63 g/cm³ com o ensaio.

4.2.2.2 Determinação da Massa Específica Aparente ou Unitária

De acordo com a ABNT NBR 16972:2021, foi realizado o ensaio para determinação da Massa Unitária da areia. O ensaio foi realizado 3 vezes consecutivas, conforme o indicado em norma.

A massa unitária foi obtida mediante a expressão:

Equação 2
$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{m_{ar} - m_r}{V}$$

Onde:

m_{ar} = massa do recipiente com o agregado (g);

m_r = massa do recipiente vazio (g);

V = volume (cm³).

Tabela 5 - Resultados obtidos no ensaio para determinação da Massa Unitária da Areia

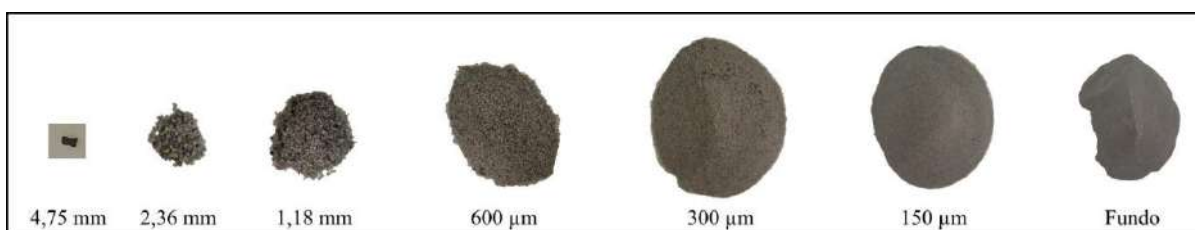
Identificação da Massa Específica Aparente ou Unitária da Areia					
Ensaio	Recipiente vazio (g)	Recipiente com agregado (g)	Massa da areia (g)	Volume (cm³)	Massa Unitária (g/cm³)
1	119,68	787,34	667,66	400,57	1,667
2	119,68	779,96	660,28	400,57	1,648
3	119,68	783,82	664,14	400,57	1,658
Média	119,68	783,71	664,03	400,57	1,658

Fonte: autora (2026).

4.2.2.3 Composição granulométrica

Conforme a ABNT NBR 17054:2022, foi realizado o ensaio para determinação da composição granulométrica da areia, utilizando as peneiras indicadas na norma em um agitador mecânico. Foi obtido o valor de módulo de finura (MF) igual a 1,85, o que corresponde a areia fina.

Figura 16 - Areia retida em cada uma das peneiras após ensaio



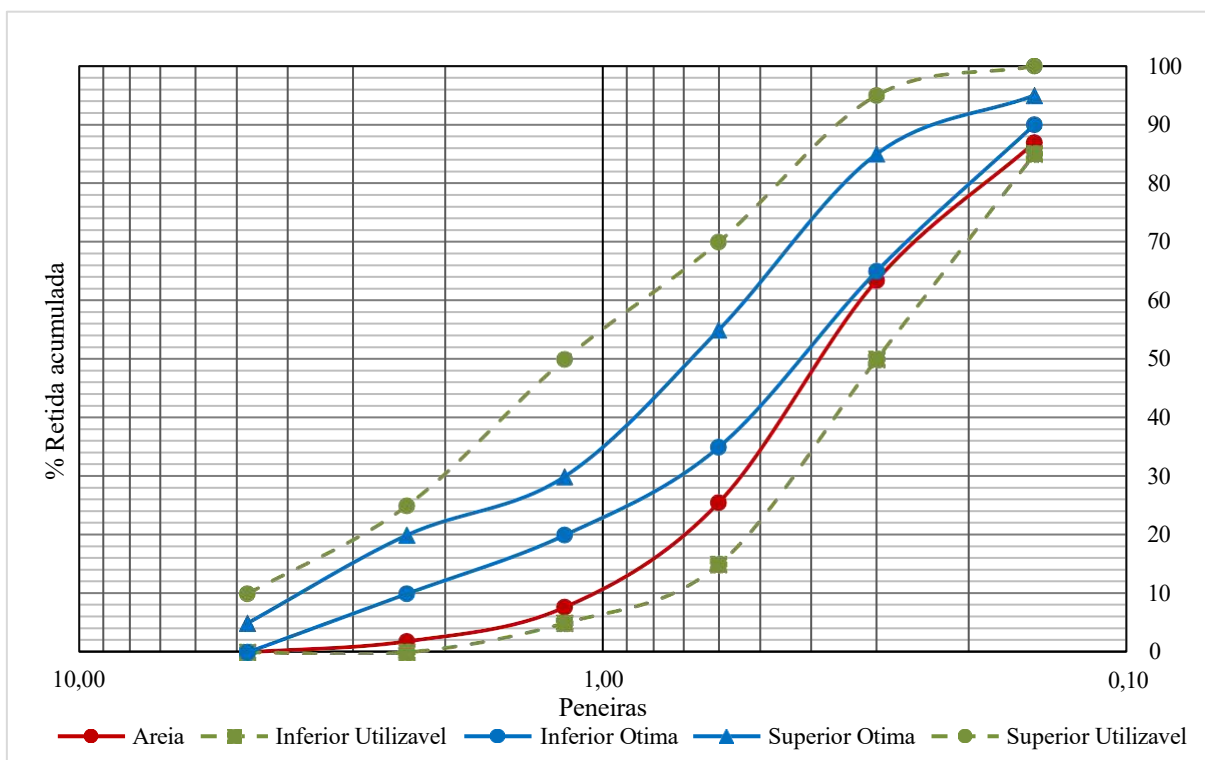
Fonte: autora (2026)

Tabela 6 - Resultados obtidos com o ensaio de determinação granulométrica

Identificação da Granulometria da Areia					
Peneira (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Passante acumulada	% Retida acumulada	Módulo de finura (MF)
4,75	0,12	0,02%	99,98%	0,02%	1,85
2,36	9,24	1,85%	98,12%	1,88%	
1,18	29,02	5,82%	92,30%	7,70%	
0,60	88,98	17,85%	74,45%	25,55%	
0,30	188,93	37,90%	36,55%	63,45%	
0,15	117,06	23,48%	13,07%	86,93%	
fundo	65,13	13,07%			
Inicial (g)	500,00	100%			
Perdas (g)	1,52	0,3%			

Fonte: autora (2026)

Figura 17 - Curva Granulométrica da areia



Fonte: autora (2026)

4.2.3 Resíduo de madeira dos dormentes

Devido ao estado avançado de desgaste do material, não foi possível obter informações concretas sobre a idade, espécie ou tipo de preservativo utilizado nos dormentes. Entretanto, técnicos e responsáveis na CBTU especularam que a madeira das amostras se trata de uma espécie nobre como jatobá, massaranduba ou carvalho. Responsáveis no setor de engenharia ambiental da Companhia, informam que o preservativo utilizado não se trata de creosoto, que foi banido da Companhia por seu caráter tóxico, e que, na realidade, era utilizado um preservativo à base de cobre injetado à vácuo em autoclave, com absorção mínima definida em norma por dormente impregnado – possivelmente, o CCA.

Frente a dificuldade de rastreabilidade dos dormentes, optou-se por tratar as fibras de madeira apenas como resíduos, uma vez que essa é a realidade de muitas companhias ferroviárias e que, em geral, resíduos sólidos reaproveitados não costumam ter um extenso histórico referente às suas origens.

4.2.3.1 Determinação da Massa Específica Aparente ou Unitária

De acordo com a ABNT NBR 16972:2021, foi realizado o ensaio para determinação da Massa Unitária do resíduo. O ensaio foi realizado 3 vezes consecutivas, conforme indicado em norma.

A massa unitária foi obtida mediante a expressão:

Equação 3
$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{m_{ar}-m_r}{V}$$

Onde:

m_{ar} = massa do recipiente com o agregado (g);

m_r = massa do recipiente vazio (g);

V = volume (cm³).

Tabela 7 - Resultados obtidos no ensaio para determinação da Massa Unitária das partículas

Identificação da Massa Específica Aparente ou Unitária da Madeira					
Ensaio	Recipiente vazio (g)	Recipiente com resíduo (g)	Massa da Madeira (g)	Volume (cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)
1	119,68	218,73	99,05	400,57	0,247
2	119,68	222,77	103,09	400,57	0,257
3	119,68	220,79	101,11	400,57	0,252
Média	119,68	220,76	101,08	400,57	0,252

Fonte: autora (2026).

4.2.3.2 Composição granulométrica

Inicialmente, o resíduo foi processado em triturador do tipo picador florestal (wood chipper), normalmente utilizado para poda de árvores.

A amostra foi peneirada em malhas de 4,75 e 2,36 mm antes do ensaio granulométrico, portanto, os resultados apresentados a seguir referem-se exclusivamente à fração passante nessa peneira (2,36 mm). A descontinuidade no gráfico (Figura 19), representa a ausência de massa retida na peneira de 4,75 mm.

Foram utilizados 350 g para realização do ensaio, conforme a massa mínima estabelecida pela NBR 17054:2022 – 300 g para $DMC \leq 4,75$ mm, uma vez que para utilizar-se 500 g seria necessária uma grande quantidade de material, visto a sua baixa densidade.

Conforme a ABNT NBR 17054:2022, foi realizado o ensaio para determinação da composição granulométrica das partículas de madeira, utilizando as peneiras indicadas na norma em um agitador mecânico.

Figura 18 - Partículas retidas em cada uma das peneiras após ensaio



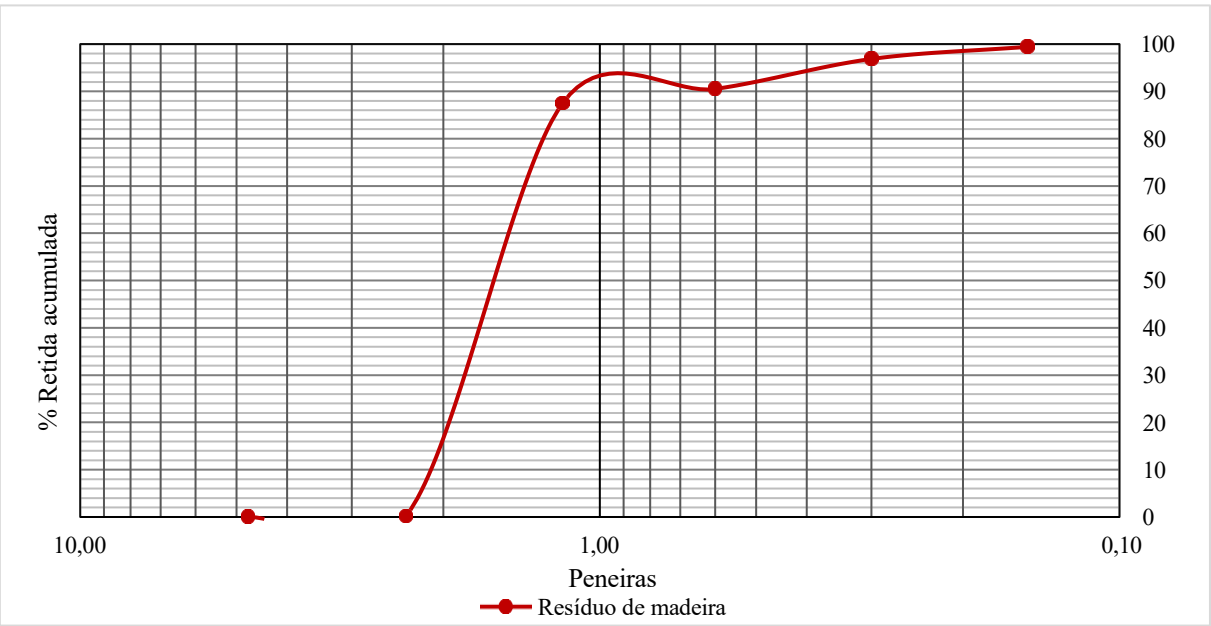
Fonte: autora (2026).

Tabela 8 - Resultados obtidos com o ensaio de determinação granulométrica

Identificação da Granulometria da Madeira					
Peneira (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Passante acumulada	% Retida acumulada	Módulo de finura (MF)
4,75	0,00	0,00%	100,00%	0,00%	3,74
2,36	0,55	0,16%	99,84%	0,16%	
1,18	305,20	87,31%	12,64%	87,36%	
0,60	10,60	3,03%	9,61%	90,39%	
0,30	22,20	6,35%	3,27%	96,73%	
0,15	9,00	2,57%	0,70%	99,30%	
fundo	2,00	0,57%			
Inicial (g)	350,00	100%			
Perdas (g)	0,45	0,1%			

Fonte: autora (2026)

Figura 19 - Curva Granulométrica do resíduo de madeira



Fonte: autora (2026)

Foi obtido o valor de módulo de finura (MF) igual a 3,74, o que corresponderia a uma areia grossa, próxima ao limite para pedrisco. Para efeito de comparação, areias médias utilizadas em construção civil apresentam MF entre 2,6 e 3,0, portanto, o resíduo analisado é significativamente mais grosso, o que pode influenciar sua trabalhabilidade em argamassas e compósitos. Entretanto, para fins experimentais, optou-se por utilizar o material mesmo assim, a fim de analisar a sua influência no desempenho físico-mecânico no compósito.

4.3 Dosagem dos traços e moldagem dos corpos de prova

Foram dosados 4 traços, sendo 1 referência (T0) de argamassa com 1:3 (cimento:areia) sem fibra, e os demais com incorporação das partículas de madeira com teores de 5% (T5), 10% (T10) e 15% (T15) em substituição parcial do volume de areia.

Ao todo, foram moldados 48 corpos-de-prova, 24 do tipo prismático e 24 do tipo cilíndrico, sendo 3 amostras por idade (7 e 28 dias) de cada traço, conforme o mínimo indicado na ABNT NBR 7215:2019 e na ABNT NBR 13279:2005. A mistura mecânica seguiu a ABNT NBR 7215:2019, adaptada para o material experimental.

A relação água/cimento de 0,50 foi mantida para a moldagem de todos os traços e a quantidade de resíduo em massa necessária para 6 corpos-de-prova cilíndricos e 6 corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 50x100 mm e 40x40x160 mm, respectivamente, foi calculada utilizando a Massa Unitária (MU), obtida no ensaio no tópico 4.2.3.1. Determinação da Massa Específica Aparente ou Unitária deste documento.

O cálculo foi realizado mediante a seguinte expressão:

$$\text{Equação 4} \quad V_{\text{areia substituída}} = \frac{m_{\text{areia ref.}} \times \%_{\text{substituída}}}{\mu_{\text{areia}}}$$

$$V_{\text{areia substituída}} = \frac{2100 \times \left(\frac{5}{100}\right)}{1,658} \rightarrow V_{\text{areia substituída}} = 63,33 \text{ cm}^3$$

Onde:

$m_{\text{areia ref.}}$ = massa de areia do traço referência T0 (g);

$\%_{\text{substituída}}$ = teor de substituição 5%, 10% ou 15%;

μ_{areia} = massa unitária da areia (g/cm³).

Esse volume corresponde a 5% do volume de areia numa massa de 2,10 kg, dosada para o traço de referência (T0), a fim de se obter a massa correspondente de resíduo, em gramas.

Sabendo que a massa unitária das partículas de madeira foi de 0,252 g/cm³, temos:

Equação 5

$$m_{partículas} = V_{areia\ substituída} \times \mu_{particulado}$$

$$m_{partículas} = 63,33 \times 0,252 \rightarrow m_{partículas} = 15,96\ g$$

Portanto, para a substituição de 5% do volume de areia no traço T5, tomando como referência o T0, foi usado 15,96 g do particulado. A mesma metodologia foi usada para o cálculo dos traços T10 e T15, e os resultados obtidos constam nas tabelas abaixo:

Tabela 9 - Quantidade de materiais (g) para 6 moldagens em corpos de prova cilíndricos

Corpo de Prova Cilíndrico					
Traços	Quantidade de materiais (g) para 06 moldagens de cada traço				Traço (C:A:M:W)
	Cimento	Areia	Água	Particulado de madeira (2,36 mm)	
T0	700	2100	350	0	1:3,0:0:0,5
T5	700	1995	350	15,96	1:2,85:0,023:0,5
T10	700	1890	350	31,92	1:2,70:0,046:0,5
T15	700	1785	350	47,88	1:2,55:0,068:0,5

Fonte: autora (2026)

Tabela 10 - Quantidade de materiais (g) para 6 moldagens em corpos de prova prismáticos

Corpo de Prova Prismático					
Traços	Quantidade de materiais (g) para 06 moldagens de cada traço				Traço (C:A:M:W)
	Cimento	Areia	Água	Particulado de madeira (2,36 mm)	
T0	905	2715	453	0	1:3,0:0:0,5
T5	905	2579	453	20,63	1:2,85:0,023:0,5
T10	905	2444	453	41,27	1:2,70:0,046:0,5
T15	905	2308	453	61,9	1:2,55:0,068:0,5

Fonte: autora (2026)

Para a moldagem dos corpos de prova foi usada uma argamassadeira, moldes prismáticos e cilíndricos, paquímetro e mesa de consistência manual, espátula, soquete metálico para adensamento entre camadas e um molde de tronco de cone para aferição da consistência dos traços, além de balanças de precisão.

Figura 20 - Moldes cilíndrico e prismático, respectivamente



Fonte: autora (2026)

Figura 21 - Argamassadeira



Fonte: autora (2026)

Figura 22 - Balanças de precisão



Fonte: autora (2026)

Figura 23 - Cuba, soquete metálico, espátula e paquímetro, respectivamente



Fonte: autora (2026)

Figura 24 - Corpos de prova cilíndricos (T10 e T5) pós-moldagem



Fonte: autora (2026)

Foi realizada a cura à seco das 48 amostras, visando inibir a fissuração por absorção excessiva de água, uma vez que as fibras de madeira contidas na composição da argamassa têm propriedade altamente higroscópica e podem reter ou liberar umidade, com risco de expandir no interior do material, gerando pressões internas indesejadas e, conseqüentemente, provocar microfissuras na zona de transição entre a fibra e a matriz, comprometendo a aderência e a resistência mecânica final do material (Garcez *et al.*, 2016; Savastano & Agopyan, 1997).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Índices de Consistência por traço

Imediatamente após a moldagem dos traços, foram realizados os ensaios para obtenção do índice de Consistência, utilizando a mesa de consistência e o molde troncônico, assim como um soquete para adensamento entre camadas (15, 10 e 5 golpes), conforme indicado na ABNT NBR 13276:2016.

Figura 25 - Mesa de Consistência



Fonte: autora (2026)

Após a retirada do molde, foi feito o acionamento da manivela 30 vezes num período de ± 30 segundos, para queda sucessiva da mesa e espalhamento uniforme da massa. Foram aferidos 3 diâmetros de espalhamento da argamassa de cada traço, utilizando um paquímetro.

Figura 26 - Aferição dos diâmetros com o paquímetro



Fonte: autora (2026)

Os valores obtidos foram registrados e a média calculada refere-se ao Índice de Consistência do determinado traço, conforme registrado na tabela abaixo:

Tabela 11 - Índice de Consistência por traço

Traço	Diâmetros (mm)			SD	Média
	1	2	3		
T0	161,52	166,55	159,85	3,5	163
T5	155,83	159,91	160,60	2,6	159
T10	163,07	161,99	162,86	0,6	163
T15	201,30	198,53	206,77	4,2	202

Fonte: autora (2026)

Figura 27 - Diâmetros aferidos para obtenção do Índice de Consistência



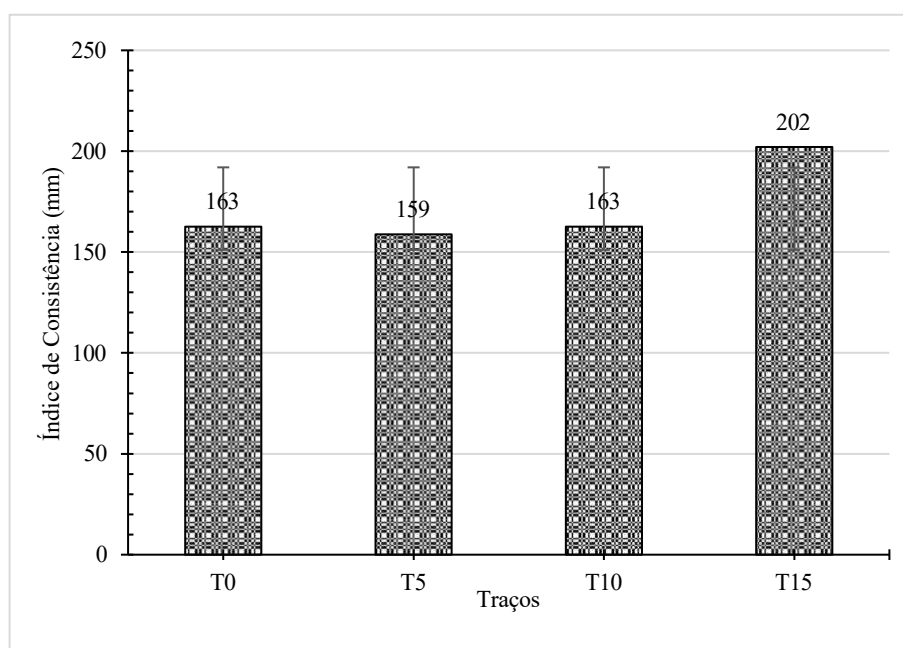
Fonte: autora (2026)

A partir dos resultados, foi possível verificar que consistência se manteve ligeiramente constante nos traços T0, T5 e T10 — entre 159 e 163 mm — o que demonstra que as substituições parciais do volume agregado miúdo por até 10% de resíduo não alteraram significativamente a trabalhabilidade do compósito. Geralmente, a adição de fibras vegetais tem a tendência de reduzir a fluidez da argamassa, uma vez que as partículas “sequestram” a água livre da mistura (Macêdo *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2021). A estabilidade verificada sugere que a redução do volume de areia compensou a absorção de água pelo resíduo, mantendo a viscosidade da pasta nos traços T5 e T10.

Entretanto, o Índice de Consistência do traço T15 foi afetado significativamente com o maior volume de resíduo incorporado, o que indica uma elevada fluidez da argamassa, afetando negativamente o desenvolvimento de resistência dos testemunhos, o que foi comprovado na queda drástica de resistência verificada nos ensaios de Resistência à Compressão (Item 5.2) e de Resistência à Tração (Item 5.3) do mesmo traço. Entretanto, segundo estudos correlatos, o Índice de Consistência de ± 200 mm garante consistência e trabalhabilidade adequadas para aplicações de argamassa (Formosa *et al.*, 2011 *apud* Silva *et al.*, 2021).

Apesar da variação do Índice de Consistência, as argamassas se mantiveram coesas e sem segregação ou exsudação aparente. Geralmente, o incremento de fibras corrobora com a diminuição da consistência da argamassa, entretanto, o oposto foi verificado em T15.

Figura 28 - Índice de Consistência (mm) por traço



Fonte: autora (2026)

5.2 Resistência à Compressão Axial aos 7 e 28 dias de idade

Foi adotado o procedimento indicado na ABNT NBR 7215:2019 para a realização do ensaio de verificação da Resistência à Compressão Axial das amostras cilíndricas de cada traço, nas idades de 7 e 28 dias do compósito. As amostras foram submetidas ao ensaio e o resultado (indicado em toneladas-força) foi registrado assim que se verificou a fissuração da peça.

Figura 29 - Ensaio de Resistência à Compressão, prensa da marca Solotest



Fonte: autora (2026)

Figura 30 - Corpos-de-prova pós-ensaio de resistência à compressão aos 7 dias



Fonte: autora (2026)

Figura 31 - Corpos-de-prova pós-ensaio de resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: autora (2026)

O cálculo da resistência à compressão dos testemunhos de cada traço se deu através da expressão, conforme indicado na NBR 7215:

Equação 6

$$f_c = \frac{F_c}{A}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão axial individual (MPa);

F_c é a carga aplicada verticalmente no centro do cilindro (N);

A é área nominal individual (mm²).

O cálculo da resistência média à compressão do traço na idade referente se deu a partir da média entre as três variáveis obtidas.

Tabela 12 - Resistência à Compressão Axial aos 7 e 28 dias (MPa)

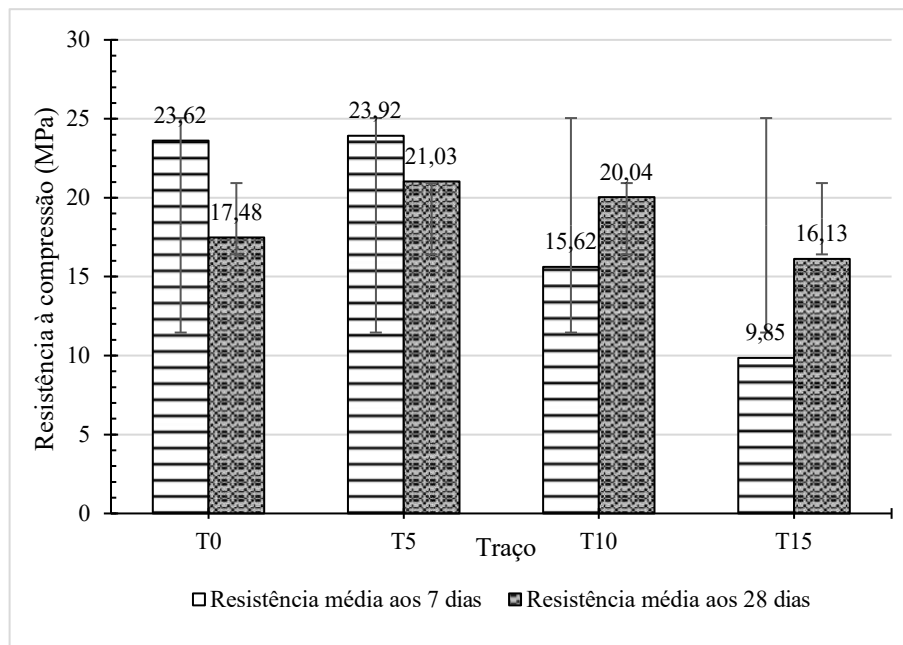
Resistência à Compressão Axial (MPa)										
Traços	7 DIAS					28 DIAS				
	1	2	3	SD	Média	4	5	6	SD	Média
T0	27,40	20,82	22,63	3,4	23,62	15,78	24,57	12,09	6,4	17,48
T5	22,35	25,50	8,08*	9,3	23,92	21,39	24,57	17,13	3,7	21,03
T10	16,87	14,45	15,54	1,2	15,62	17,97	17,40	24,74	4,1	20,04
T15	8,99	9,95	10,62	0,8	9,85	17,97	18,81	11,62	3,9	16,13

Fonte: autora (2026)

Em virtude da discrepância do resultado obtido no ensaio da 3ª amostra de T5 (8,08 MPa) em comparação aos demais do mesmo traço, optou-se por recalcular a média nesta idade

desconsiderando o referido resultado, uma vez que o desvio padrão (SD) mostrou-se demasiadamente alto, indicando possível anomalia experimental.

Figura 32 - Resistência Média à Compressão por traço aos 7 e 28 dias de idade



Fonte: autora (2026)

Os resultados mostraram um aumento de resistência à compressão de cerca de 1,28% com a incorporação de 5% de resíduo e a redução equivalente do volume de areia (T5), em comparação ao traço referência (T0) aos 7 dias de idade. Entretanto, a queda brusca de resistência entre os traços T5 e T10 — 23,92 e 15,62 MPa, respectivamente — marca o início de uma tendência de queda conforme o aumento do teor de fibra e a diminuição do volume de areia no traço, implicando que teores de incorporação de resíduos de madeira > 5% podem afetar negativamente na resistência do compósito, e que teores $\leq 5\%$, teores ótimos, podem aumentar a resistência à compressão.

Tais resultados podem ser justificados pelo Efeito Filler do resíduo, cujas partículas finas presentes na mistura atuam como um material de preenchimento, ocupando vazios entre a areia e o cimento. Esse resultado pode se inverter caso haja excesso de fibra vegetal, uma vez que a natureza macroporosa da madeira supera o Efeito Filler — em outras palavras, os vazios no material excedem a capacidade de preenchimento das partículas finas de madeira.

Outro fator é a boa compatibilidade do resíduo com o CP II F-40, que contém filer calcário e potencializa o ganho de resistência inicial. No caso do traço T5, a inibição química causada pelos extrativos e açúcares remanescentes na madeira ainda é baixa o suficiente para ser vencida pela alta taxa de hidratação deste cimento, permitindo a preponderância das

melhoras físicas sobre os malefícios químicos, o que acaba se invertendo com a maior concentração do resíduo nos traços T10 (15,62 MPa) e T15 (9,85 MPa).

O comportamento observado apresenta concordância com os resultados encontrados na literatura, como o de Silva *et al.* (2021), onde o traço com 5% de substituição (ARM5,0) obteve 11,90 MPa, superando a argamassa de referência (AREF) que obteve 11,30 MPa.

Já aos 28 dias de idade, os materiais apresentaram resultados fortuitos, uma vez que houve queda de resistência ao invés de ganho nos traços T0 e T5. Além da própria variabilidade experimental e da mínima amostragem disponível (3 corpos-de-prova por idade), a queda brusca da resistência média à compressão de T0 dos 7 aos 28 dias de idade pode ser justificada pela escolha da cura à seco, realizada em todos os corpos-de-prova, a fim de evitar a fissuração das amostras com fibra vegetal incorporada e manter a comparabilidade entre traços, a escolha desse método de cura não favoreceu o desenvolvimento de resistência à longo prazo das amostras sem resíduo, uma vez que o material pode ter sofrido retração por secagem, provocando microfissuras ao longo das amostras.

Entretanto, os resultados indicam que graças a natureza higroscópica da madeira, as amostras com incorporação de fibra aparentaram sofrer uma “cura interna”, uma vez que as partículas liberaram gradualmente a água retida em seus poros à medida em que o cimento se hidratou, favorecendo o desenvolvimento de resistência à longo prazo, o que se verifica principalmente no traço T15, onde verificou-se um aumento de quase 63,7% da resistência entre os 7 e 28 dias de idade.

A resistência média à compressão do traço T5 se manteve praticamente estável nas idades de 7 e 28 dias, variando de 23,92 MPa para 21,03 MPa, com diferença de ± 2 MPa. Isso confirma que o teor de 5% pode ser considerado um "ponto de equilíbrio" onde os benefícios físicos do resíduo superam as perdas causadas pela substituição do agregado mineral denso.

5.3 Resistência à Tração na Flexão aos 7 e 28 dias de idade

Foi adotado o procedimento indicado na ABNT NBR 13279:2005 para a realização do ensaio de verificação da Resistência à Tração na Flexão das amostras prismáticas de cada traço, nas idades de 7 e 28 dias do compósito. As amostras foram submetidas ao ensaio e o resultado (indicado em toneladas-força) foi registrado assim que se verificou a fissuração da peça.

Figura 33 - Ensaio de Resistência à Tração na Flexão aos 7 dias (T0)



Fonte: autora (2026)

Figura 34 - Ensaio de Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias (T15)



Fonte: autora (2026)

A resistência à tração na flexão foi calculada segundo a equação retirada da referida norma:

Equação 7
$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3}$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão (MPa);

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L é a distância entre os suportes (mm).

Figura 35 - Distância entre os suportes (L)



Fonte: autora (2026)

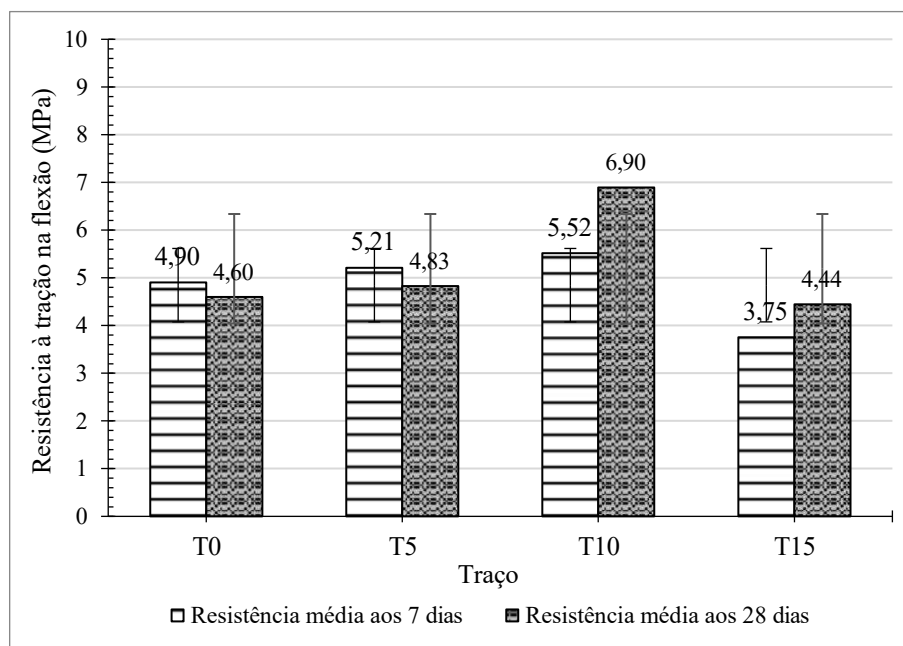
A partir dos resultados obtidos, foi calculada a média aritmética dos testemunhos. Como o desvio padrão (SD) não foi discrepante, considerou-se a média real entre os 3 corpos para todos os traços nas idades de 7 e 28 dias.

Tabela 13 - Resistência à Tração na Flexão aos 7 e 28 dias (MPa)

Resistência à tração na flexão (MPa)										
Traços	7 DIAS					28 DIAS				
	1	2	3	SD	MÉDIA	4	5	6	SD	MÉDIA
T0	4,83	5,29	4,60	0,4	4,90	5,06	5,29	3,45	1,0	4,60
T5	4,83	5,29	5,52	0,4	5,21	5,75	5,06	3,68	1,1	4,83
T10	5,06	6,21	5,29	0,6	5,52	7,58	6,90	6,21	0,7	6,90
T15	3,91	3,22	4,14	0,5	3,75	3,45	6,21	3,68	1,5	4,44

Fonte: autora (2026)

Figura 36 - Resistência Média à Tração por traço aos 7 e 28 dias de idade



Fonte: autora (2026)

Aos 7 dias de idade observou-se aumento de 6,4% na resistência à tração nas peças com 5%, e de 12,7% com 10% de resíduo, em comparação à resistência média do traço referência (T0).

Savastano Junior *et al.*, 1994 (*apud* Macêdo, 2011), demonstram que as fibras vegetais possuem baixo módulo de elasticidade e elevada resistência à tração, e ao serem associadas a uma matriz cimentícia, obtém-se um material com modo de fissura por dissipação de energia, capaz de trabalhar no estágio pós-fissurado, com aplicabilidade ótima em situações de carregamento constante e grande resistência a impactos, podendo provocar o *Bridge Effect* ou Efeito Ponte, gerado pelas fibras do resíduo de dormente no conjunto compósito, que atuam como uma rede de reforço que intercepta as microfissuras que surgem sob o esforço, conforme foi verificado por meio dos resultados durante o ensaio dos testemunhos dos traços T5 e T10.

Ademais, a relação a/c de 0,50 pode ter afetado negativamente o traço referência, uma vez que o excesso de água livre no material influencia diretamente no aumento da porosidade (Mehta & Monteiro, 2014), enquanto que nos traços contendo fibra de madeira, a água foi absorvida de maneira gradual, reduzindo a relação a/c real ao redor das partículas no material, resultando em pastas mais resistentes que a do traço T0. Além disso, conforme inferido anteriormente nos resultados do ensaio de compressão, o material pode ter sofrido retração por secagem, uma vez que foi curado à seco, provocando microfissuras ao longo das amostras, especialmente na argamassa sem fibra.

Verificou-se uma tendência de queda de resistência com a incorporação de maiores teores de resíduo (T10 e T15), reafirmando que valores $\leq 5\%$ estão numa faixa ótima, e têm potencial de melhorar a resistência mecânica do material, ao que valores acima dessa faixa podem provocar excesso de poros e vazios que não conseguem ser superados pelas propriedades benéficas da fibra. Em outras palavras, a interface cimento-madeira torna-se mais frágil e tende a gerar microfissuras sob tensão de tração.

Aos 28 dias de idade, a resistência média à tração de T0 teve uma queda de 6% em relação ao resultado aos 7 dias, conforme esperado para uma argamassa comum, sob condições de cura atípicas (à seco).

Para o traço T5, também se observou queda de resistência aos 28 dias (4,83 MPa, demonstrando que os benefícios alcançados anteriormente pela presença da fibra vegetal não se sustentaram à longo prazo, resultado inverso ao observado para T10, que teve o maior ganho em resistência — cerca de 25%.

Seja pelo menor volume de água retida nas fibras de T5 em comparação ao T10, seja pelo equilíbrio de efeitos positivos e negativos — Efeito Fíler neutralizado pelo surgimento de microfissuras nas peças — foi possível verificar que o teor de 10% apresenta ótimo potencial no que se refere ao desenvolvimento de resistência à tração do compósito, especialmente à longo prazo, pois seu volume de resíduo foi suficiente pra promover a cura interna gradual dos corpos de prova sem atingir o nível de saturação química (açúcares, taninos e compostos químicos presentes no tratamento químico da madeira) e física deletéria (excesso de poros e vazios) observada na queda da resistência de T15.

5.4 Caracterização das amostras

5.4.1 Densidade Aparente por traço

A partir da medição das dimensões dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos com um paquímetro de resolução 0,1 mm, seguido da pesagem de cada uma das amostras numa balança com resolução 0,1 g, foi possível calcular a Densidade Aparente média por traço, conforme a expressão a seguir:

Equação 8
$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{V}$$

Onde:

$\rho_{m\acute{a}x}$ é a densidade aparente (g/cm³);

m é a massa do corpo-de-prova (g);

V é o volume do corpo-de-prova (cm³).

Figura 37- Medição das dimensões dos corpos-de-prova



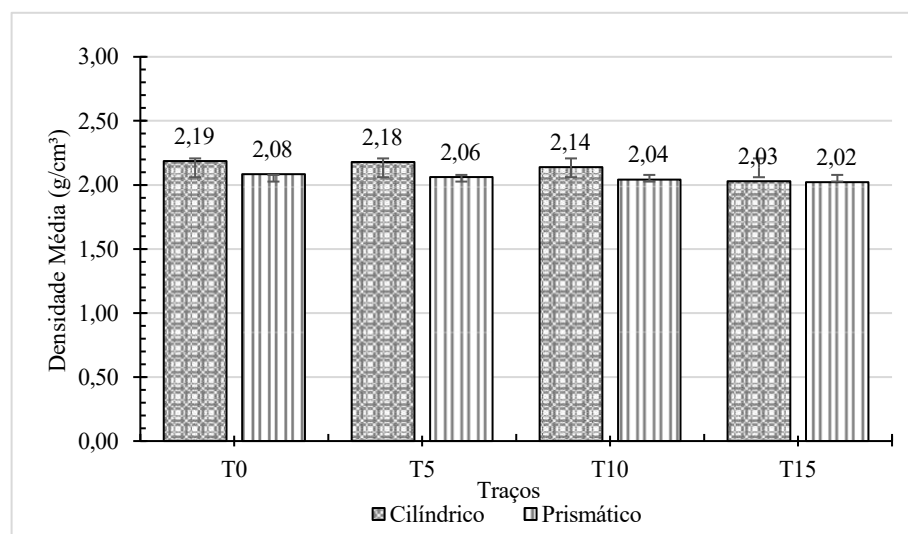
Fonte: autora (2026)

Figura 38 - Pesagem dos corpos-de-prova



Fonte: autora (2026)

Figura 39 - Densidade Aparente média das amostras cilíndricas e prismáticas



Fonte: autora (2026)

Observa-se uma tendência de decréscimo da Densidade Aparente do compósito com o aumento do teor da fibra no traço, resultado esperado, uma vez que a areia foi parcialmente substituída pelo resíduo de dormente, que é consideravelmente mais leve. Ainda que a substituição tenha sido em volume, resultou na queda da densidade do material — típica característica esperada de materiais compósitos com adição de fibras vegetais (Silva *et al.*, 2021; Garcez *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2022; Hansted *et al.*, 2021).

Ademais, o aumento da porosidade com o aumento do teor do resíduo vegetal contribuiu para a queda da densidade dos materiais.

Por fim, conforme observado na literatura, existe uma correlação entre a densidade de um material e a sua resistência à compressão (Matoski & Iwakiri, 2007; Garcez *et al.*, 2016). A maior “leveza” do traço T15 (2,02 g/cm³) justifica, em parte, o porquê do seu desempenho mecânico, em ambos os ensaios (Resistência à Compressão e Resistência à Tração), ter sido o menor entre todos os traços analisados.

5.4.2 Análise visual e porosidade

Foram analisadas visualmente amostras prismáticas dos corpos-de-prova de cada traço, a fim de explorar as diferenças visuais macro e microscópicas e conferir a porosidade em cada uma delas, a fim de relacioná-las com os resultados obtidos nos ensaios físico-mecânicos realizados ao longo deste trabalho.

Figura 40 - Corpos-de-prova dos traços T0, T5, T10 e T15, respectivamente



Fonte: autora (2026)

Verifica-se uma diferença nítida de coloração superficial entre as amostras do traço referência (T0) e dos traços contendo fibra (T5, T10 e T15) — as amostras escureceram

gradualmente à medida em que o teor de fibra aumentou — o que indica possíveis reações químicas entre a pasta de cimento e as partículas de madeira, como a concentração de extrativos naturais contidos nas fibras, como açúcares, taninos e fenóis, que podem migrar para a superfície da partícula e da matriz cimentícia (Castro, 2021; Gloria *et al.*, 2020). Além disso, a presença do preservativo químico dos dormentes, que não pôde ser extraído completamente com o pré-tratamento em água quente, pode ter afetado a coloração mais escura dos testemunhos com maior quantidade de madeira (Figuras 14 e 15).

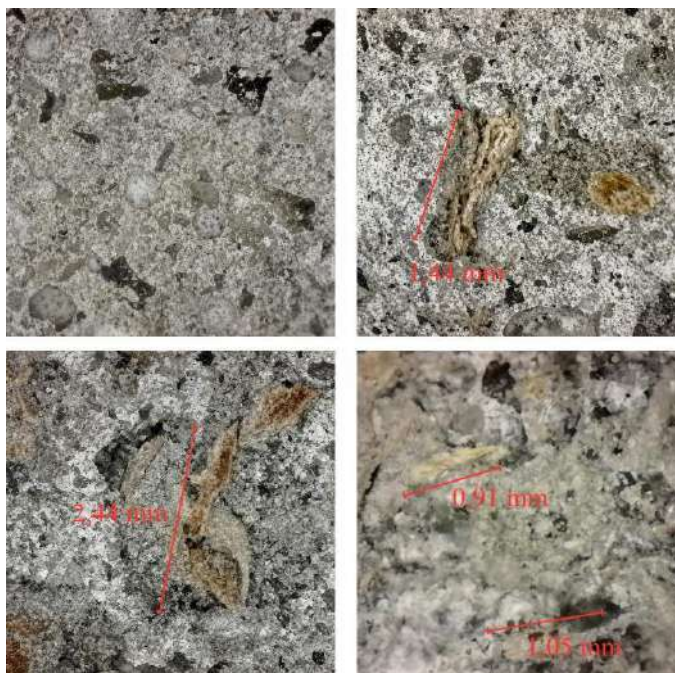
Com um Microscópio Digital, foram registradas as superfícies dos corpos-de-prova prismáticos, pós-rompimento do ensaio de Resistência à Tração:

Figura 41 - Microscópio Digital USB 1600x



Fonte: Bodega Aurrera (2026)

Figura 42 - Microscopia das amostras de T0, T5, T10 e T15, respectivamente



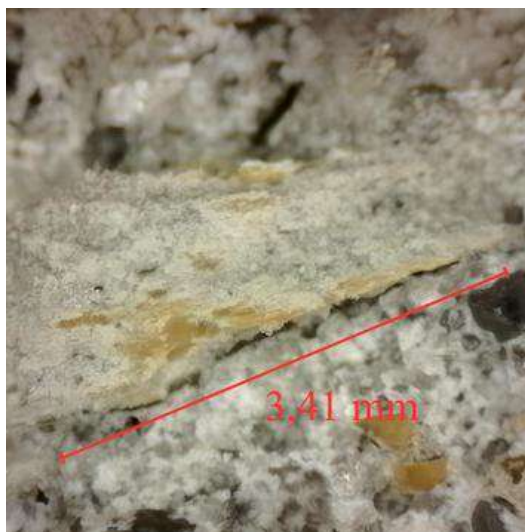
Fonte: autora (2026)

As análises microscópicas evidenciaram que o aumento do teor de resíduo de dormente promoveu alterações progressivas na microestrutura dos compósitos, como o aumento gradual de poros e vazios no conjunto, assim como o progressivo rejeite das partículas de madeira pela pasta de cimento, mostrando a queda da compatibilidade entre os materiais e a gradual fragilidade na interface cimento-madeira, o que confirma a tendência de queda da Resistência à Tração e à Compressão, especialmente a partir de 10% de fibra incorporada e, de forma crítica em teores iguais ou superiores à 15%.

Conforme Castro (2021), se o endurecimento do cimento for impedido pela presença de fibras vegetais, como a madeira, eles são tidos como incompatíveis, podendo afetar negativamente as propriedades físicas do compósito, e até criar corpos-de-prova sem nenhuma integridade física.

Nos registros dos corpos-de-prova dos traços na faixa de 5-10%, especialmente de T5, foi possível visualizar o envolvimento adequado das partículas do resíduo pela pasta de cimento na matriz do compósito, conferindo a melhoria momentânea da resistência do material com teores $\leq 5\%$ de fibra vegetal incorporada, o que foi observado nos resultados dos ensaios de resistência nos itens 5.2 e 5.3 deste documento.

Figura 43 - Fibra vegetal em um corpo-de-prova (T15)



Fonte: autora (2026)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou o potencial de aproveitamento de resíduos lignocelulósicos de dormentes ferroviários inoperantes em compósitos cimentícios, por meio da incorporação de partículas de madeira em teores de 5%, 10% e 15%, em substituição parcial da areia, com relação água/cimento fixa de 0,50. O programa experimental incluiu ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias de idade, determinação do índice de consistência e a densidade aparente dos corpos-de-prova.

Nos ensaios de resistência à compressão axial, a análise aos 7 dias indicou que o desempenho mecânico do traço T5 superou T0, enquanto T10 e T15 mostraram tendência de queda com o aumento do teor. Aos 28 dias, T0 e T5 apresentaram redução de resistência em relação ao observado aos 7 dias, o que foi atribuído, na discussão do trabalho, ao regime de cura à seco.

Nos traços com resíduo, os resultados sugerem a ocorrência de cura interna que contribuiu para o desenvolvimento de resistência em idades posteriores, com destaque para o traço T15, que apresentou aumento expressivo entre 7 e 28 dias (9,85 MPa para 16,13 MPa). Contudo, apesar dessa contribuição temporal, o desempenho global em T15 permaneceu inferior ao de traços com teores mais moderados. Essa tendência é compatível com a literatura revisada, que indica que o Efeito Fíler pode melhorar o desempenho em teores moderados, porém, em proporções elevadas de resíduo, o aumento da macroporosidade passa a prevalecer, prejudicando o comportamento mecânico.

No que se refere à resistência à tração na flexão, observou-se comportamento favorável dos traços com resíduo quando comparados ao T0: aos 7 dias, T5 e T10 apresentaram elevação dos valores médios, enquanto T15 exibiu tendência de piora. Aos 28 dias, os resultados apontaram que T10 apresentou o melhor desempenho na tração na flexão (6,90 MPa) entre os traços avaliados, enquanto T15 voltou a registrar redução relevante.

A interpretação adotada no trabalho é coerente com a literatura revisada sobre compósitos com fibras vegetais: a incorporação de partículas lignocelulósicas tende a promover um mecanismo de dissipação de energia no pós-fissuramento e a formação do efeito ponte (*bridge effect*), no qual as partículas/fibras atuam como elementos capazes de interceptar e restringir a propagação de microfissuras. Adicionalmente, a manutenção do desempenho em T10 foi associada ao equilíbrio entre volume de resíduo suficiente para promover a cura interna gradual e a preservação, até certo limite, da integridade interfacial e da coesão do compósito,

já em T15, a maior quantidade de partículas implicou excesso de vazios e fragilização interfacial, reduzindo a capacidade resistente sob solicitação de tração.

Os resultados indicaram que a incorporação em 5% de resíduo conferiu aumento de resistência à compressão e que a incorporação em 10% demonstrou melhorar o desempenho de resistência à tração na flexão, evidenciando um equilíbrio mais favorável entre efeitos físicos (empacotamento, cura interna e atuação de reforço) e efeitos deletérios (porosidade, inibição local e fragilização interfacial). Já o teor de 15% tende a ultrapassar o limite de compatibilidade entre o particulado lignocelulósico e a matriz cimentícia, resultando em perda de coesão interna, aumento de vazios e redução das resistências mecânicas, apesar de sinais pontuais de ganho em idade mais avançada decorrentes da higroscopicidade das partículas, corroborando a literatura revisada ao longo do trabalho, que aponta que compósitos cimento-madeira frequentemente apresentam redução de resistência à compressão à medida que o teor de fibra/resíduo cresce.

Nesse contexto, observou-se o estabelecimento de uma faixa ótima de incorporação (<5%), na qual os efeitos físicos benéficos do particulado e a contribuição relacionada à higroscopicidade das partículas puderam superar, em parte, os efeitos deletérios do aumento de vazios e da inibição local da hidratação.

Quanto à trabalhabilidade, os índices de consistência mostraram que a incorporação de resíduo em teores até 10% (T5 e T10) manteve valores próximos ao traço de referência, indicando que a redução volumétrica de areia compensou, em parte, a absorção de água pelo particulado, preservando a consistência da argamassa. Por outro lado, o traço T15 apresentou variação significativa no índice de consistência, sugerindo comportamento reológico e de empacotamento inadequado. Entretanto, apesar da queda acentuada da resistência mecânica, observada nos ensaios de compressão e flexão, verificou-se manutenção da coesão interna do compósito.

A avaliação da densidade aparente dos corpo-de-prova mostrou-se coerente com o desempenho mecânico dos traços. Verificou-se tendência de redução da densidade com o aumento do teor de resíduo — resultado esperado devido à substituição parcial do agregado mineral por material menos denso e à maior tendência de formação de vazios/porosidade em misturas com maior conteúdo lignocelulósico — que foi associada ao declínio da resistência, particularmente no traço T15, em consonância com a principal vantagem dos CMCs verificada nas pesquisas, que é a redução da massa específica, resultando em materiais de construção mais leves, de fácil manuseio e transporte.

Além disso, verificou-se, a partir das pesquisas realizadas em bases de dados científicas, especificadas no início deste documento, a ausência ou escassez de normativas técnicas ou

procedimentos consolidados em âmbito nacional específicos para tratar do acondicionamento ou descarte seguro de dormentes de madeira tratados, conforme registrado em diversas regiões do país, a exemplo da CBTU, cujos materiais descartados encontravam-se em estado de lixiviação e em direto contato com o solo, por tempo indeterminado.

Atualmente, verifica-se que a rota mais segura e comum para o manejo destes passivos é o aterro, sendo também bastante dispendiosa, considerando o elevado volume de dormentes de madeira substituídos rotineiramente. A partir dessa discussão, verificou-se que a incorporação de pequenos teores ($\leq 5\%$) desses resíduos em compósitos cimentícios pode ser considerada uma rota menos custosa e segura, graças ao encapsulamento dos metais pesados contidos nos preservativos da madeira na matriz cimentícia. Ademais, provou-se, a partir dos ensaios de Resistência à Compressão e de Resistência à Tração que o material tem ótimo potencial peso/resistência, entretanto sendo limitado em aplicações com solicitações elevadas, como na composição de dormentes, podendo ser utilizado em aplicações não-estruturais como elementos de vedação.

Em suma, enquanto as normas técnicas de resíduos sólidos (ABNT) reconhecem a madeira tratada como um resíduo perigoso, a principal regulamentação ambiental para construção civil (CONAMA) ainda falha em tratar esse material com a devida especificidade, reforçando a necessidade de ressignificar o uso deste material na construção civil.

Por fim, considerando o contexto ambiental apresentado — em que dormentes tratados configuram resíduos com potencial de toxicidade por origem e risco por lixiviação de preservativos — e diante das limitações enfrentadas no desenvolvimento deste trabalho, a encapsulação do resíduo em matriz cimentícia constitui uma alternativa alinhada com diretrizes de destinação mais segura e produtiva, conforme a literatura, desde que o comportamento mecânico obtido seja compatível com aplicações pretendidas. Entretanto, não foram realizados ensaios de lixiviação ou avaliação de impacto ambiental neste trabalho. Complementarmente, existe uma grande lacuna na literatura no que se refere a análises mais aprofundadas quanto às propriedades de CMCs, especialmente quando as fibras são oriundas de materiais reciclados, estimulando o desenvolvimento de novas pesquisas a respeito do material. Assim, o presente estudo fornece evidências experimentais que sustentam o direcionamento do resíduo para formulações com teores entre 5% e 10%, oferecendo uma contribuição relevante tanto para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis quanto para a mitigação de passivos ambientais associados ao descarte inadequado desses elementos.

Dessa forma, conclui-se que o aproveitamento de madeira de dormentes ferroviários em argamassas cimentícias é tecnicamente viável, desde que adotados teores controlados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- _____. **NBR 10004-1**: resíduos sólidos - Classificação – Parte 1: requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- _____. **NBR 10004-2**: resíduos sólidos - Classificação – Parte 2: sistema geral de classificação de resíduos (SGCR). Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- _____. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- _____. **NBR 16972**: agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- _____. **NBR 17054**: agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- _____. **NBR 7215**: cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- _____. **NBR 7511**: Dormentes de madeira - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ALENCAR, Ignez Santiago. **Dormentes de madeira tratados com creosoto, alternativas para reposição e reúso: estudo de caso da Estrada de Ferro Carajás com vistas à saúde ambiental**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17022016-124101/>.
- ALVES, G. K. A.; SINAY, M. C. F. Os dormentes ferroviários, seu tratamento e o meio ambiente. In: RIO DE TRANSPORTES, 3., 2005, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2005. CD-ROM.
- AMIANDAMHEN, S. O.; IZEKOR, D. N. Effect of wood particle geometry and pre-treatments on the strength and sorption properties of cement-bonded particle boards. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 5, n. 2, p. 318-322, 2013.
- ASHORI, A.; TABARSA, T.; AMOSI, F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood-cement composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 126-129, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.016>.

- BARROS, J. G. *et al.* Viabilidade do uso de fibras vegetais para construções sustentáveis: uma revisão. **Revista Observatorio de la Economía Latino americana**, 2023.
- BERALDO; A. L.; PIMENTEL, I.; LIMA, I. I.; BARCHET, V. G. Efeito de tratamentos físico-químicos sobre a resistência à compressão de compósitos de madeira cimento. **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 6. 1998, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: IBRAMEM, 1998. v. 4, p. 263-271.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos= resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002. Disponível em: <https://www2.cprh.pe.gov.br/2002/07/05/resolucao-conama-no-307-de-5-de-julho-de-2002/>.
- BRAZOLIN, S. *et al.* Preservação de madeiras: sistema de classe de risco - revisão da NBR 7190, Anexo D. In: **ENCONTRO NACIONAL ABPM**, 7., 2007, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2007.
- BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983. v. 1-2.
- CASTRO, V. G. **Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o futuro**. Mossoró: EdUFERSA, 2021. 127 p. ISBN 978-65-87108-26-1. DOI: 10.7476/9786587108612.
- CUNHA, P. F. C. **Utilização do dormente polimérico como alternativa às ferrovias brasileiras**. 2013. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- DA GLORIA, M'hamed Yassin Rajiv; ANDREOLA, Vanessa Maria; SANTOS, Daniele Oliveira Justo dos; PEPE, Marco; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites. **Journal of Building Engineering**, v. 34, art. 101696, 2020. DOI: 10.1016/j.job.2020.101696. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101696>.
- DAMAS, Thyago de Silos. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do compósito cimento-madeira utilizando farinha de madeira Pinus com cimento Portland**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.
- DAMASCENO, F. G.; MATLABA, V. J.; SANTOS, J. F.; MOTA, J. A. Reaproveitamento de dormentes de madeira da Estrada de Ferro Carajás para a cogeração de energia elétrica. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 45, p. 1-18, set. 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Especificação técnica de material **ETM-003: dormentes**. Brasília, DF: DNIT, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/especificacoes-tecnicas-de-materiais-e-servicos-ferroviarios-etm-ets/etm-003-dormentes.pdf>.

- FERRARINI, S. F.; MIRANDA, L. G.; MAIA, S. M.; PIRES, M. Madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA): opções de destino para os resíduos gerados e perspectivas no desenvolvimento de metodologias para a remoção de elementos tóxicos. **Periódico Tchê Química**, v. 12, p. 7-21, 2015.
- FRYBORT, S.; RAIMUND, M.; ALFRED, T.; MULLER, U. Cement bonded composites: a mechanical review. **BioResources**, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008.
- GARCEZ, M. R. *et al.* Propriedades mecânicas de compósitos cimento-madeira com serragem tratada de *Pinus elliottii*. **Ciência da Madeira**, 2016.
- GUO, H.; WANG, P.; LI, Q.; LIU, G.; FAN, Q.; YUE, G.; SONG, S.; ZHENG, S.; WANG, L.; GUO, Y. Properties of light cementitious composite materials with waste wood chips. **Materials, Basel**, v. 15, n. 23, art. 8669, 2022. DOI: 10.3390/ma15238669. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15238669>.
- HANSTED, F. A. S.; HANSTED, A. L. S.; YAMAMOTO, H.; CHRISTOFORO, A. L.; YAMAJI, F. M.; CAMPOS, C. I. de. Potencial de reciclagem de resíduos de madeira e cinza de caldeira de biomassa em um material compósito cimentício. **Revista Principia**, [S. l.], v. 60, n. 4, p. 1398–1412, 2023. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id6646. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/6646>.
- HOERLLE, C. R.; BREHM, F. A. **Aspectos e impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado da madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA)**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 10., 2016.
- ICIMOTO, F. H. **Dormentes de madeira lamelada colada (MLC) reforçados com tecidos de fibra de vidro**. 2018. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- LEITE, M. A. V.; CAMPOS, C. I. de; SOUZA, A. J. D. de; MOLINA, J. C.; SILVA, M. F. F.; SILVA, J. V. F. Análise do desempenho físico-mecânico de compósitos cimentícios com adição de partículas de madeira de eucalipto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 25, e138689, 2025. DOI: 10.1590/S1678-86212025000100811.
- MACÊDO, A. N.; LIMA, A. M. de; FONSECA, F. de O.; LAVÔR, B. V. de A. Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira. **Revista Matéria**, v. 16, n. 2, p. 658-667, 2011. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11146>.
- MARTINS FILHO, Sergio Tunis; MARTINS, Carlos Humberto. Quantificação da emissão de CO₂ para pavers com substituição parcial de areia por cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 431-448, 2016. DOI: 10.17765/2176-9168.2016v9n2p431-448. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/4347>.

- MATOSKI, Adalberto; IWAKIRI, Setsuo. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 149-158, 2007. DOI: 10.5380/rf.v37i2.8646. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rf.v37i2.8646>.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NOLASCO, A. C. P.; SILVA, V. O. **Análise teórica das alternativas viáveis para o reaproveitamento de dormentes de madeira**. In: CONTECC, 2023.
- OHGAMI, N. *et al.* Carcinogenic risk of chromium, copper and arsenic in CCA-treated wood. **Environmental Pollution**, v. 206, p. 456-460, 2015. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.07.041.
- RIBEIRO, Umberto Gonçalves. **Desempenho térmico, acústico e mecânico de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.
- ROMAGNANO, Ligia Ferrari Torella di; BRAZOLIN, Sérgio. **Gerenciamento de resíduos de madeira preservada**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2005.
- SALLES, Ana Claudia Nioac de. **Emissões de gases de efeito estufa dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha com base nos seus ciclos de vida**. 2009. 201 p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2009.
- SANTOS, Caroline Emiliano; CANDATEN, Luana; SILVA, Paulo Roberto Bairros da; TREVISAN, Rômulo. Madeira preservada com CCA: proficuidade, potencial deletério, toxicidade dos resíduos e tecnologias de recuperação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 1, p. 153-166, 2022. DOI: 10.17765/2176-9168.2022v15n1e8871.
- SAVASTANO JÚNIOR, Holmer; AGOPYAN, Vahan. Estudo da microestrutura de materiais compósitos: um caminho para otimizar seu desempenho. **Tecnología y Construcción**, Caracas, v. 13, n. 2, p. 35-39, 1997.
- SEVEN RESÍDUOS. **Madeira tratada com CCA: classificação e destinação correta**. [S. l.], 15 abr. 2026. Disponível em: <https://sevenresiduos.com.br/madeira-tratada-cca-creosoto-classificacao-nbr-10004-destinacao-industrial/>.
- SHAH, I. H.; MILLER, S. A.; JIANG, D.; MYERS, R. J. Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO₂ emissions by up to 1.3 gigatons. **Nature Communications**, v. 13, n. 5758, 2022.
- SILVA, J. S. *et al.* Análise das características físicas e propriedades mecânicas de argamassa com inserção de resíduos de madeira. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, e12936, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/GZFy9q8sxP6Gb49XPp369Fd/>.

- VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. de C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 257-271, 2015. DOI: 10.5902/1980509817484. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/17484>.
- 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**, v. 21, n. 1, e11777, 2017.
- 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. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n36p50-59.

APÊNDICE A – Caracterização das amostras

Tabela 14 - Características dos Corpos-de-Prova Cilíndricos

T0						
Amostra	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	9,97	5,01	429,20	196,54	19,72	2,18
2	9,95	5,04	430,10	198,82	19,97	2,16
3	9,99	5,04	431,80	199,46	19,97	2,16
4	10,01	5,00	428,50	196,70	19,64	2,18
5	10,08	5,02	447,30	199,53	19,80	2,24
6	10,04	5,03	436,70	199,59	19,87	2,19
Média	10,01	5,02	433,93	198,44	19,83	2,19
SD	0,05	0,02	7,18	1,44	0,13	0,03
T5						
Amostra	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	9,99	5,02	429,60	197,67	19,79	2,17
2	9,97	5,04	429,90	198,57	19,92	2,16
3	10,01	5,02	438,20	197,96	19,78	2,21
4	10,03	5,02	432,00	198,16	19,76	2,18
5	9,96	5,01	424,50	195,96	19,67	2,17
6	9,97	5,01	428,00	196,33	19,70	2,18
Média	9,99	5,02	430,37	197,44	19,77	2,18
SD	0,03	0,01	4,58	1,05	0,09	0,02
T10						
Amostra	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	10,01	5,07	428,20	202,01	20,17	2,12
2	10,06	5,04	423,50	200,86	19,96	2,11
3	10,20	5,06	425,20	204,65	20,07	2,08
4	10,05	5,01	429,40	198,04	19,70	2,17
5	10,11	5,00	434,50	198,33	19,61	2,19
6	10,00	5,02	429,80	197,67	19,78	2,17
Média	10,07	5,03	428,43	200,26	19,88	2,14
SD	0,07	0,03	3,86	2,76	0,22	0,04
T15						
Amostra	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	9,98	5,03	406,79	198,18	19,86	2,05
2	9,93	5,05	399,75	198,60	20,01	2,01
3	10,05	5,04	405,57	200,50	19,94	2,02
4	10,02	5,01	400,70	197,35	19,70	2,03
5	9,99	5,02	401,10	197,45	19,76	2,03
6	10,01	5,03	400,40	198,60	19,84	2,02
Média	10,00	5,03	402,39	198,45	19,85	2,03
SD	0,04	0,01	3,00	1,14	0,11	0,01

Fonte: autora (2026)

Tabela 15 - Características dos Corpos-de-Prova Prismáticos

T0							
Amostra	Altura (cm)	Espessura (cm)	Largura (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	16,19	4,04	4,11	547,80	268,62	66,57	2,04
2	16,11	4,01	4,01	547,90	258,66	64,55	2,12
3	16,16	4,03	4,08	549,00	265,45	65,95	2,07
4	16,05	4,01	4,12	553,90	264,69	66,07	2,09
5	16,13	4,04	4,11	555,30	267,78	66,25	2,07
6	16,07	4,04	4,01	548,20	260,18	64,38	2,11
Média	16,12	4,03	4,07	550,35	264,23	65,63	2,083
SD	0,06	0,02	0,05	3,35	4,03	0,93	0,03
T5							
Amostra	Altura (cm)	Espessura (cm)	Largura (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	16,17	4,06	4,11	564,40	269,54	66,42	2,09
2	16,13	4,07	4,09	556,80	268,37	66,02	2,07
3	16,16	4,06	4,14	559,50	271,60	66,85	2,06
4	16,10	4,17	4,14	567,00	277,93	66,63	2,04
5	16,17	4,08	4,14	564,30	272,93	66,90	2,07
6	16,11	4,17	4,15	565,10	278,83	66,86	2,03
Média	16,14	4,10	4,13	562,85	273,20	66,61	2,06
SD	0,03	0,05	0,02	3,86	4,32	0,34	0,02
T10							
Amostra	Altura (cm)	Espessura (cm)	Largura (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	16,08	4,14	4,11	549,40	273,84	66,11	2,01
2	16,07	4,01	4,01	542,30	258,23	64,40	2,10
3	16,07	4,09	4,08	542,90	268,00	65,56	2,03
4	16,06	4,11	4,12	545,20	271,52	66,13	2,01
5	16,06	4,14	4,11	547,30	273,25	65,95	2,00
6	16,03	4,00	4,01	541,70	257,06	64,23	2,11
Média	16,06	4,08	4,07	544,80	266,98	65,40	2,04
SD	0,02	0,06	0,05	3,07	7,52	0,86	0,05
T15							
Amostra	Altura (cm)	Espessura (cm)	Largura (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)	Área (cm²)	Densidade Aparente (g/cm³)
1	16,03	4,05	4,12	532,20	267,44	66,04	1,99
2	16,04	4,01	4,01	532,10	258,04	64,35	2,06
3	16,06	4,06	4,02	531,20	262,56	64,61	2,02
4	16,03	4,14	4,15	544,50	275,26	66,44	1,98
5	16,04	4,04	4,04	530,60	261,72	64,73	2,03
6	16,05	4,09	4,04	543,20	264,57	64,77	2,05
Média	16,04	4,07	4,06	535,63	264,93	65,15	2,02
SD	0,01	0,05	0,06	6,41	5,94	0,86	0,03

Fonte: autora (2026)

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850

Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)

CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia

Assunto:	Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia
Assinado por:	Maria Eduarda
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Maria Eduarda Batista Freitas, ALUNO (201922220002) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - JOÃO PESSOA, em 10/07/2026 11:25:44.

Este documento foi armazenado no SUAP em 10/07/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1909264
Código de Autenticação: cf35f76b83

