UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THAÍSA MARIANA SANTIAGO ROCHA

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNA COM RESÍDUOS DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E DIFERENTES AGLOMERANTES MINERAIS

CURITIBA 2023

THAÍSA MARIANA SANTIAGO ROCHA

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNA COM RESÍDUOS DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO E DIFERENTES AGLOMERANTES MINERAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, no Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosemback Miranda Coorientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Alice Parchen Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Augusto Pescador Sardá

CURITIBA 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP) UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Rocha, Thaísa Mariana Santiago

Contribuição ao desenvolvimento de placas de vedação vertical internas com resíduos de madeira de construção e diferentes aglomerantes minerais / Thaísa Mariana Santiago Rocha. - Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Leonardo Fagundes Rosemback Miranda Coorientadores: Carlos Frederico Alice Parchen ; Alexandre Augusto Pescador Sardá

1. Resíduos como material de construção. 2. Madeiras, Resíduos de. 3. Gesso. 4. Cimento Portland. 5. Isolamento térmico. 6. Isolamento acústico. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Miranda, Leonardo Fagundes Rosemback. IV. Parchen, Carlos Frederico Alice. V. Sardá, Alexandre Augusto Pescador. VI. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SETOR DE TECNOLOGIA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **THAÍSA MARIANA SANTIAGO ROCHA** intitulada: **Contribuição ao desenvolvimento de placas de vedação vertical internas com resíduos de madeira de construção e diferentes aglomerantes minerais**, sob orientação do Prof. Dr. LEONARDO FAGUNDES ROSEMBACK MIRANDA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica 27/09/2023 13:08:09.0 LEONARDO FAGUNDES ROSEMBACK MIRANDA Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica 27/09/2023 12:29:12.0 ANTÔNIO ACACIO DE MELO NETO Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica 27/09/2023 13:50:16.0 JOSÉ GUILHERME PRATA Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ) Assinatura Eletrônica 28/09/2023 09:31:40.0 NAYARA SOARES KLEIN Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica 16/10/2023 20:41:27.0 SILVIA MARIA DE SOUZA SELMO Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Dedico este trabalho a todas as mulheres que antecederam a minha existência, permitindo que eu me tornasse o que almejasse, em especial às minhas avós Antônia Campillos Rocha (*in memoriam*) e Zélia Maria Santiago (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pela fé que me sustém.

Aos meus pais, Carlos Alberto e Maria Janete. Em especial à minha mãe, a quem devo tudo o que sou e tudo o que almejo me tornar. À minha irmã, Bárbara, pelos ensinamentos e carinho desde que nasceu, e por compreender que a distância física não nos afasta. Aos meus familiares pelo apoio e incentivo em todas as etapas da minha vida.

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Leonardo Fagundes Rosemback Miranda, pela amizade, pela paciência nos meus momentos de ansiedade e dúvida, pelo ensinamento além da teoria e pela motivação que me transmitiu em todas as nossas reuniões. Obrigada por acreditar em mim!

Aos meus coorientadores, Prof^o Dr. Carlos Frederico Alice Parchen e Prof^o Alexandre Augusto Pescador Sardá, pelas considerações relevantes a este estudo.

À Professora Nayara Soares Klein por todo o conhecimento transmitido desde a graduação e por, além de me ensinar, contribuir para a aplicação do empacotamento de partículas neste estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (PPGEC/UFPR), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Araucária pela bolsa concedida.

À Prefeitura Municipal de Curitiba pelo incentivo à continuidade do doutorado (2021-2022), em especial às engenheiras Margarete Martin e Viviane Bauer que muito me ensinaram com sua experiência profissional e pessoal.

Ao Instituto Federal do Paraná pelo incentivo a partir da realização da Ação de Desenvolvimento em Serviço para Pós-Graduação (ADS-Pós) (2022-2023), em especial aos colegas Alexandre Milchert, Aline Skowronski, Ana Lídia Cascales e João Otávio pelo apoio no dia a dia, pela amizade e pelos momentos de descontração.

Às amigas que permanecem no meu coração e que se enchem de orgulho por mais simples que seja a novidade contada, Luriana Dalla Vecchia, Sabrina Requião, Ana Paula Capraro, Ana Paula Mikos.

Ao meu noivo Douglas Zeni. Pelo nosso amor e nosso relacionamento, que incluem meus medos, inseguranças e dúvidas. Sua presença me acalmou, motivou e proporcionou que eu sonhasse e fizesse planos. Você está presente em cada linha escrita e ensaio realizado deste estudo, obrigada por tudo! Estou ansiosa pela realização dos próximos projetos e dos capítulos que ainda escreveremos juntos na nossa história.

"Depois do medo, vem o mundo." Clarice Lispector

RESUMO

As atividades da indústria da construção civil produzem um volume expressivo de resíduos de construção e demolição (RCD) e, por isso, estudos têm sido realizados no intuito de promover e viabilizar a incorporação do RCD reciclado como matéria-prima em novos produtos e componentes úteis para a sociedade. Materiais compósitos são uma alternativa para o reaproveitamento dos resíduos de madeira resultantes das atividades do setor da construção civil. Seguindo esta tendência, o objetivo deste estudo é contribuir para o desenvolvimento de placas de vedação vertical interna com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira contendo partículas de madeira reciclada proveniente de RCD em sua composição e, para isso, avaliar suas propriedades físicas, mecânicas, químicas, e de desempenho mecânico, acústico e térmico. Os resíduos de madeira (de compensado, de eucalipto e de pínus) foram coletados em canteiros de obras, moídos, tratados e secos; caracterizados e classificados em três diferentes composições granulométricas (CG01, CG03, CGP1,2) para a produção de compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira. Foi realizado o estudo da influência da composição granulométrica nos compósitos com diferentes proporções aglomerante/madeira e a relação água/aglomerante foi fixada em 0,50 para o cimento e em 0,70 para o gesso, sendo avaliadas as propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e endurecido. Na sequência, foi realizado o estudo da influência do aditivo superplastificante (no teor de 1% com relação à massa de aglomerante) nos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira sendo realizados ensaios no estado fresco e endurecido. Foi realizado, também, o estudo do empacotamento das partículas de madeira em que foram comparadas as curvas granulométricas CG01 com modelos da literatura e, na sequência, foi aplicado o modelo de Alfred para obter as proporções dos materiais necessários para produzir um compósito com maior densidade de empacotamento. Por fim, foram produzidas placas de vedação verticais internas com os compósitos de madeira desenvolvidos para verificar as propriedades físicas, mecânicas e químicas; e, o desempenho mecânico, acústico e térmico. Como resultado, foi observado que a proporção aglomerante/madeira (em volume) de 1,86 para compósitos de cimento-madeira e 2,22 para compósitos de gesso-madeira - determinada a partir do empacotamento de partículas apresentaram, além de viabilidade de produção devido ao índice de consistência necessário, densidade de massa e resistência à tração na flexão superiores às demais proporções avaliadas. Por fim, foi possível concluir que as placas produzidas com os compósitos desenvolvidos atenderam parcialmente os requisitos de desempenho mecânico definidos pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021) e NBR 14715-2 (ABNT, 2021). Por outro lado, nenhum compósito atendeu ao nível de desempenho acústico mínimo determinado pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021), apesar de apresentarem índice de redução sonora entre 10,6 dB e 32,9 dB. Com relação ao desempenho térmico, as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira desenvolvidos apresentaram isolamento térmico superior à amostra de referência para exposições superiores a 50 minutos. Enquanto as placas produzidas com compósitos de gesso-madeira apresentaram isolamento térmico superior à amostra de referência para exposições compreendidas no intervalo de 0 a 40 minutos. É importante destacar que os ensaios de desempenho foram realizados apenas com uma placa por amostra.

Palavras-chave: resíduos de construção; resíduos de madeira; gesso; cimento Portland; compósitos; vedação vertical; desempenho térmico; desempenho acústico.

ABSTRACT

Construction industry produce an expressive volume of the construction and demolition waste (CDW). Thus, studies have been carried out to enable the incorporation of recycled CDW as a raw material in new products and components useful for the society. Wood composites arise as an alternative for the reuse of wood waste resulting from the activities of the construction sector. This study aims to develop internal vertical sealing plates. These plates will be produced with wood-cement composites and wood-gypsum composites containing wood particles from CDW. And to evaluate their physical, mechanical, chemical, and performance properties. mechanical, acoustic and thermal. Wood residues (plywood, eucalyptus and pine) were collected at construction sites, ground, treated and dried; characterized and classified into three different granulometric compositions (CG01, CG03, CGP1,2) for the production of cement-wood and gypsum-wood composites. A study was carried out on the influence of the granulometric composition on the composites with different binder/wood proportions and the water/binder ratio was set at 0.50 for cement and 0.70 for gypsum, with the physical and mechanical properties being evaluated in the state fresh and hardened. Next, a study was carried out of the influence of the superplasticizer additive (in a content of 1% in relation to the mass of binder) on the cement-wood and gypsum-wood composites, with tests carried out in the fresh and hardened state. A study was also carried out on the packing of wood particles, in which the granulometric curves CG01 were compared with models from the literature and the Alfred model was applied to get the proportions of the materials needed to produce a composite with higher density packaging. Finally, internal vertical sealing plates were produced with the wood composites developed to verify the physical, mechanical and chemical properties; and, the mechanical, acoustic and thermal performance. As a result, it was observed that the binder/wood ratio (in volume) of 1.86 for cement-wood composites and 2.22 for gypsum-wood composites - determined from particle packing - presented, also to the feasibility of production due to the required consistency index, mass density and flexural tensile strength superior to the other evaluated proportions. Finally, it was possible to conclude that the boards produced with the developed composites met the mechanical performance requirements defined by NBR 15575-4 (ABNT, 2021) and NBR 14715-2 (ABNT, 2021). But, no composite met the smallest acoustic performance level determined by NBR 15575-4 (ABNT, 2021), despite having a sound reduction index between 10.6 dB and 32.9 dB. With regard to thermal performance, the boards produced with the wood-cement composites developed showed superior thermal insulation to the reference sample for exposures longer than 50 minutes. While the boards produced with wood-gypsum composites showed superior thermal insulation than the reference sample for exposures between 0 and 40 minutes. It is important to emphasize that the performance tests were carried out with only one plate per sample.

Keywords: construction waste; wood waste; plaster; Portland cement; composites; vertical sealing; thermal performance; acoustic performance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1-1 – RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO DEMOLIÇÃO (RCD) DE MADEIRA. 36
FIGURA 2.1-2 – PRODUTOS DESENVOLVIDOS CONTENDO RESÍDUOS DE
MADEIRA
FIGURA 2.1-3 – MODELO DA ESTRUTURA DA MADEIRA – [a] FOLHOSA E [b]
CONÍFERA
FIGURA 2.3-1 – REPRESENTAÇÃO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM
CONCRETOS
FIGURA 2.4-1 – PAREDE PRÉ-FABRICADA [a] E MÓDULO DE UM
EMPREENDIMENTO EM CONSTRUÇÃO [b]63
FIGURA 2.4-2 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM PLACAS DE FORRO [a],
ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BORDA [b] E ENSAIO DE IMPACTO
EM PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL [c]
FIGURA 2.4-3 – TESTE TÉRMICO NÃO PADRONIZADO REALIZADO PARA
ESTUDAR O COMPORTAMENTO TÉRMICO DA PLACA DESENVOLVIDA [a] E
IMAGEM TÉRMICA DAS AMOSTRAS AVALIADAS E AS DISTRIBUIÇÕES DA
TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE [b]
FIGURA 3-1 – FLUXOGRAMA DOS ESTUDOS REALIZADOS DURANTE O
DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL
FIGURA 3.1-1 – FLUXOGRAMA DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS
FIGURA 3.1-2 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER DO CIMENTO CPV
ARI-RS
FIGURA 3.1-3 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER DO GESSO
FIGURA 3.1-4 – PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA DO
GESSO
FIGURA 3.1-5 – MOINHO DE MARTELOS UTILIZADO PARA A MOAGEM DOS
RESÍDUOS DE MADEIRA77
FIGURA 3.1-6 – MOAGEM DO RESÍDUO DE COMPENSADO MULTILAMINADO 78
FIGURA 3.1-7 – MOAGEM DO RESÍDUO DE EUCALIPTUS SPP
FIGURA 3.1-8 – MOAGEM DO RESÍDUO DE PÍNUS SPP
FIGURA 3.1-9 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECICLADAS

FIGURA 3.1-10 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE
MADEIRA RECICLADAS
FIGURA 3.1-11 – MASSA UNITÁRIA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS
FIGURA 3.1-12 – PROCEDIMENTOS PARA REALIZAR A DETERMINAÇÃO DA
GEOMETRIA DAS PARTÍCULAS RECICLADAS
FIGURA 3.1-13 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA OBTER AS IMAGENS DAS
PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS
FIGURA 3.1-14 – PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS COMPREENDIDAS NO
INTERVALO DE 1,18 mm A 0,15 mm
FIGURA 3.1-15 – PREPARO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS PARA A
REALIZAÇÃO DA IMAGEM DE MEV85
FIGURA 3.1-16 – IMAGENS DE MEV DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS
FIGURA 3.1-17 – IMAGENS DOS TIPOS DE PAPEL <i>KRAFT</i> PARDO UTILIZADOS 88
FIGURA 3.2-1 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECICLADAS EM COMPÓSITOS 90
FIGURA 3.2-2 – PROCEDIMENTO DE PRÉ-TRATAMENTO REALIZADO NAS
PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS91
FIGURA 3.3-1 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO
SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECICLADAS
FIGURA 3.4-1 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DO EMPACOTAMENTO
DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS
FIGURA 3.4-2 – COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS E DO
MODELO DE ALFRED
FIGURA 3.5-1 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DO EMPACOTAMENTO
DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS
FIGURA 3.5-2 – FORMAS COM GABARITOS METÁLICOS PARA AS PRODUÇÃO DAS
PLACAS E USO DE PLÁSTICO FILME COMO FUNDO111
FIGURA 3.5-3 – MOLDAGEM DAS PLACAS DE VEDAÇÃO COM DIMENSÕES DE
0,40x0,30x0,0125m

FIGURA 3.5-4 – CONFIGURAÇÃO DAS PLACAS DE VEDAÇÃO COM DIMENSÕES DE
0,40x0,30x0,0125m PRODUZIDAS COM PAPEL <i>KRAFT</i>
FIGURA 3.5-5 – ACONDICIONAMENTO DAS PLACAS COM DIMENSÕES DE
0,40x0,30x0,0125m
FIGURA 3.5-6 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À RUPTURA NA FLEXÃO (NA
TRANSVERSAL)
FIGURA 3.5-7 – PROCEDIMENTOS PARA A PRODUÇÃO DE PLACAS DE VEDAÇÃO
VERTICAL INTERNAS COM 1,15 m x 0,85 m x 0,0125 m 116
FIGURA 3.5-8 – CONFIGURAÇÃO DO LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E RUÍDOS
(LVR) DO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA DA UFPR 118
FIGURA 3.5-9 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO A
IMPACTOS DE CORPO DURO 119
FIGURA 3.5-10 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO A
IMPACTOS DE CORPO MOLE 120
FIGURA 3.5-11 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA
RESISTÊNCIA ÀS SOLICITAÇÕES DE PEÇAS SUSPENSAS 120
FIGURA 3.5-12 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO
ACÚSTICO
FIGURA 3.5-13 – CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DO
ENSAIO ACÚSTICO
FIGURA 3.5-14 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO
ACÚSTICO
FIGURA 3.5-15 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO
TÉRMICO EXPERIMENTAL124
FIGURA 3.5-16 – CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DO
ENSAIO TÉRMICO EXPERIMENTAL 125
FIGURA 3.5-17 – PLACAS COM AVARIAS PRODUZIDAS SEM PARTÍCULAS DE
MADEIRA RECICLADAS
FIGURA 4.1-1 – RESULTADO DOS TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PEGA DOS
COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA 128
FIGURA 4.1-2 – RESULTADO DOS TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PEGA DOS
COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA
FIGURA 4.1-3 – RESULTADO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS DE
CIMENTO-MADEIRA

FIGURA 4.1-4 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS FIGURA 4.1-5 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS FIGURA 4.1-6 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS FIGURA 4.1-7 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS FIGURA 4.1-8 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS FIGURA 4.1-9 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS FIGURA 4.1-10 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS FIGURA 4.1-11 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS FIGURA 4.1-12 – CORRELAÇÃO ENTRE A MASSA UNITÁRIA SECA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS COM A DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA......139 FIGURA 4.1-13 – CORRELAÇÕES ENTRE A MASSA UNITÁRIA SECA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS COM A DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA (a), A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (b) E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (c) DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA140 FIGURA 4.2-1 – RESULTADO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS DE FIGURA 4.2-2 – RESULTADO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS DE FIGURA 4.2-3 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE 146 FIGURA 4.2-4 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE......146 FIGURA 4.2-5 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE 148

FIGURA 4.2-6 - RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE......148 FIGURA 4.2-7 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE 149 FIGURA 4.2-8 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS FIGURA 4.2-9 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS FIGURA 4.2-10 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE......152 FIGURA 4.3-1 – CURVAS DESENVOLVIDAS A PARTIR DE MODELOS TEÓRICOS E PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS (a) CURVAS ORIGINAIS E (b) CURVAS DE NORMALIZAÇÃO......155 FIGURA 4.3-2 – MASSA UNITÁRIA (a) E DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO (b) DAS CLASSES DE TAMANHO DE CADA TIPO DE MADEIRA......158 FIGURA 4.3-3 – ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE OS RESULTADOS DA MASSA UNITÁRIA (FIGURA 4.3-2a) E DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO (FIGURA FIGURA 4.3-4 – DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DAS CURVAS DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS: (a) CALCULADA DE ACORDO COM O CPM (DE LARRARD E SEDRAN 1994; DE LARRARD 1999) E (b) A DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO EXPERIMENTAL DAS CURVAS DAS COMPOSIÇÕES FIGURA 4.3-5 – COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS CONJUNTOS BINÁRIOS PARA OBTER MAIOR DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO A PARTIR DO MODELO FIGURA 4.4-1 – RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA 170 FIGURA 4.4-2 - RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA......171 FIGURA 4.4-3 – RESULTADO DA RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS FIGURA 4.4-4 – RESULTADO DA RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA.....174

FIGURA 4.4-5 – RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE DAS PLACAS
PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA 175
FIGURA 4.4-6 – RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE DAS PLACAS
PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA175
FIGURA 4.4-7 – RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE POR RESISTÊNCIA
DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE
CIMENTO-MADEIRA176
FIGURA 4.4-8 – RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE POR RESISTÊNCIA
DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE
GESSO-MADEIRA177
FIGURA 4.4-9 – RESULTADO DA DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA POR
RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM
COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA 178
FIGURA 4.4-10 – RESULTADO DA DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA POR
RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM
COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA178
FIGURA 4.4-11 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL
DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-
MADEIRA (COM OU SEM <i>KRAFT</i>)
FIGURA 4.4-12 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL
DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA
(COM OU SEM <i>KRAFT</i>)
FIGURA 4.4-13 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE RUPTURA À FLEXÃO DAS
PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA (COM OU SEM
<i>KRAFT</i>)
FIGURA 4.4-14 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE RUPTURA À FLEXÃO DAS
PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA (COM OU SEM
<i>KRAFT</i>)
FIGURA 4.4-15 – ENSAIO DE RUPTURA À FLEXÃO NAS PLACAS PRODUZIDAS COM
PAPEL KRAFT
FIGURA 4.4-16 – PLACAS PRODUZIDAS COM OS COMPÓSITOS APÓS O ENSAIO DE
RUPTURA À FLEXÃO CONTENDO PARTÍCULAS DE COMPENSADO (a) E
EUCALIPTO (b)

FIGURA 4.4-17 – COMPARATIVO DO RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

FIGURA 4.4-18 – COMPARATIVO DO RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*) 187 FIGURA 4.4-19 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

FIGURA 4.4-24 – ANÁLISE COMPARATIVA NO INTERVALO DAS POSIÇÕES 15°2θ A 20°2θ PARA A PASTA DE CIMENTO E PARA OS COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS AOS 28 DIAS DE IDADE

193 FIGURA 4.4-25 – ANÁLISE COMPARATIVA NO INTERVALO DA POSIÇÃO 25°2θ A 35°2θ PARA A PASTA DE CIMENTO E PARA OS COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS AOS 28 DIAS DE IDADE

FIGURA 4.4-29 – ANÁLISE COMPARATIVA NO INTERVALO DA POSIÇÃO 27°20 A 37°20 PARA A PASTA DE GESSO E PARA OS COMPÓSITOS DE GESSO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS AOS 28 DIAS DE IDADE 199 FIGURA 4.4-30 – INSPEÇÃO VISUAL REALIZADA NAS PLACAS AO TÉRMINO DA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE CORPO DURO 201 FIGURA 4.4-31 - RESULTADO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE CORPO MOLE FIGURA 4.4-32 – INSPEÇÃO VISUAL REALIZADA NAS PLACAS AO TÉRMINO DA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE CORPO MOLE 203 FIGURA 4.4-33 – CORRELAÇÕES ENTRE O DESLOCAMENTO TRANSVERSAL COM A DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA, A RUPTURA À FLEXÃO E O CONSUMO DE AGLOMERANTE DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA E GESSO-FIGURA 4.4-34 – RESULTADO DE RESISTÊNCIA ÀS SOLICITAÇÕES DE PEÇAS FIGURA 4.4-35 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÀS SOLICITAÇÕES DE FIGURA 4.4-36 – RESULTADO DE DUREZA SUPERFICIAL DAS PLACAS 207 FIGURA 4.4-37 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL...... 207 FIGURA 4.4-38 - RESULTADO DOS ÍNDICES DE REDUÇÃO SONORA (R) DAS FIGURA 4.4-39 – ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA PONDERADO (Rw) DAS PLACAS FIGURA 4.4-40 - RESULTADO DOS ÍNDICES DE REDUÇÃO SONORA (R) DAS FIGURA 4.4-41 – ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA PONDERADO (Rw) DAS PLACAS

FIGURA 4.4-42 – CORRELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA E
O ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA PONDERADO (Rw) DOS COMPÓSITOS DE
CIMENTO-MADEIRA E GESSO-MADEIRA
FIGURA 4.4-43 – TEMPERATURA NO CENTRO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM
CIMENTO
FIGURA 4.4-44 – IMAGENS TÉRMICAS OBTIDAS NO INTERVALO DE 0 A 100
MINUTOS DAS PLACAS PRODUZIDAS COM CIMENTO
FIGURA 4.4-45 – TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA DAS PLACAS
PRODUZIDAS COM CIMENTO
FIGURA 4.4-46 – TEMPERATURA NO CENTRO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM
GESSO
FIGURA 4.4-47 – IMAGENS TÉRMICAS OBTIDAS NO INTERVALO DE 0 A 60
MINUTOS DAS PLACAS PRODUZIDAS COM GESSO
FIGURA 4.4-48 – TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA DAS PLACAS
PRODUZIDAS COM GESSO

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.3-1 – VALORES ATRIBUÍDOS AO ÍNDICE K
TABELA 3.1-1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CPV ARI
TABELA 3.1-2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO CPV ARI
TABELA 3.1-3 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CIMENTO CPV ARI
TABELA 3.1-4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO GESSO
TABELA 3.1-5 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO GESSO
TABELA 3.1-6 – CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO ACELERADOR DE PEGA
TABELA 3.1-7 – CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE
TABELA 3.1-8 – IDENTIFICAÇÃO DAS DIFERENTES COMPOSIÇÕES
GRANULOMÉTRICAS DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA79
TABELA 3.1-9 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECICLADAS
TABELA 3.1-10 – ÁREA SUPERFICIAL (a'), ÍNDICE DE ESBELTEZ (IdE) E RAZÃO DE
PLANICIDADE (RP) DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS
TABELA 3.1-11 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECICLADAS
TABELA 3.2-1 – COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO E MADEIRA
PRODUZIDOS PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO
GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS
TABELA 3.2-2 – COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS DE GESSO E MADEIRA
PRODUZIDOS PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO
GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS
TABELA 3.2-3 – ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO
TABELA 3.2-4 – ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO
TABELA 3.3-1 – PARÂMETROS FIXADOS PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE
TABELA 3.3-2 – RELAÇÃO ENTRE A PROPORÇÃO MADEIRA/AGLOMERANTE EM
MASSA E EM VOLUME PARA CADA TIPO DE MADEIRA AVALIADO
TABELA 3.3-3 – COMPOSIÇÕES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA PRODUZIDOS
PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE 100
TABELA 3.3-4 – ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO 101

TABELA 3.3-5 – ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO
TABELA 3.4-1 – CLASSES DE TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECICLADAS
TABELA 3.4-2 – DADOS DE ENTRADA PARA O CÓDIGO DESENVOLVIDO EM
<i>PHYTON</i> [®]
TABELA 3.5-1 – COMPOSIÇÕES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA PRODUZIDOS
PARA O ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL
INTERNAS COM 0,30 m x 0,40 x 0,0125 m 110
TABELA 3.5-2 – ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E QUÍMICOS REALIZADOS NAS
PLACAS PRODUZIDAS COM OS COMPÓSITOS113
TABELA 3.5-3 – COMPOSIÇÕES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA PRODUZIDOS
PARA O ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL
INTERNAS COM 1,15 m x 0,85 m x 0,0125 m 115
TABELA 3.5-4 – ENSAIOS DE DESEMPENHO REALIZADOS NAS PLACAS
PRODUZIDAS COM OS COMPÓSITOS 117
TABELA 3.5-5 – CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DO
ENSAIO ACÚSTICO
TABELA 4.2-1 – COMPARATIVO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS
CIMENTO-MADEIRA PRODUZIDOS COM SUPERPLASTIFICANTE
TABELA 4.2-2 – COMPARATIVO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS
GESSO-MADEIRA PRODUZIDOS COM SUPERPLASTIFICANTE
TABELA 4.3-1 – PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS OBTIDAS A PARTIR DE MODELOS
TEÓRICOS DE EMPACOTAMENTO (OS VALORES EM NEGRITO REFEREM-SE AOS
VALORES APÓS A NORMALIZAÇÃO)156
TABELA 4.3-2 – QUANTIDADE DE CADA TIPO DE MATERIAL NECESSÁRIA PARA
OBTER OS CONJUNTOS COM MAIOR DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO 167
TABELA 4.4-1 – COMPOSTOS IDENTIFICADOS NA PASTA DE CIMENTO E NOS
COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E
PÍNUS
TABELA 4.4-2 – COMPOSTOS IDENTIFICADOS NA PASTA DE GESSO E NOS
COMPÓSITOS DE GESSO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e
	Resíduos Especiais
AC	Acelerador de Pega
ANOVA	Análise de variância
CDW	Construction and Demolition Waste
CEN EN	European Comitte of Standartization
CME	Centro de Microscopia Eletrônica
CO ₂	Dióxido de Carbono
СРМ	Compressible Packing Model
CP-V ARI	Cimento Portland Tipo V de Alta Resistência Inicial
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRG	Glass Reinforced Gypsum
HB	Hardboard
HDF	High Density Fiberboard
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
ICDD	International Centre for Diffraction Data
IdE	Índice de Esbeltez
ISO	International Organization for Standartization
IV	Índice de Vazios
LAME/DCCLEDD	Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de
LAME/DCC UFPR	Construção Civil da Universidade Federal do Paraná
LAMIR	Laboratório de Análise de Minerais e Rochas
LATECA	Laboratório de Tecnologia de Argamassas
LVR	Laboratório de Vibrações e Ruídos
MDF	Medium Density Fiberboard
MDP	Medium Density Particleboard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NBR NM	Norma Brasileira e Norma Mercosul

NS	Não Significativo
OMS	Organização Mundial da Saúde
OSB	Oriented Strand Board
P.F.	Perda ao Fogo
PCE	Polycarboxylate Ether
pН	Potencial Hidrogeniônico
PR	Paraná
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
R	Índice de redução sonora (sound reduction index)
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RP	Razão de Planicidade
RPM	Rotação por minuto
S	Significativo
SC	Santa Catarina
STL	Sound Transmission Loss
SUP	Superplastificante
SVVIE	Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas
TAPPI	Testing Procedures of Technical Association of the Pulp and
	Paper Industry
TL	Perda de Transmissão Sonora (sound transmission loss)
WHO	World Health Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

А	Área de absorção equivalente da sala de recepção
a _{ij}	Efeito de afastamento
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
b _{ij}	Efeito parede
С	Consumo de aglomerante
C ₃ S	Alita
Ca	Consumo de água
Ca^{2+}	Íon de cálcio
Ca ₂ AlFeO ₅	Aluminoferrito de tetracálcico
Ca ₂ SiO ₄	Silicato dicálcico
Ca ₃ Al ₂ O ₆	Aluminato tricálcico
Ca ₃ SiO ₅	Silicato tricálcico
CaO	Óxido de cálcio
CaSO ₄ . 2H ₂ O	Gipsita
$CaSO_{4.0}, 5H_{2}O$	Sulfato de cálcio hemihidrato
CO ₂	Dióxido de carbono
CDET	Porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a
CITI	D
C-S-H	Hidratos do cimento
D	Diâmetro da partícula igual à abertura da peneira
di	Diâmetro das partículas da classe dominante chamada i
dj	Diâmetro das partículas das demais classes chamadas j
	Diâmetro máximo da partícula ou o diâmetro da maior
Dmáx	partícula
D_{min}	Diâmetro da menor partícula
D ₅₀	Diâmetro através do qual passam 50% das partículas
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro ou óxido férrico ou hematita
Finura #200	Finura na peneira nº200
Finura #325	Finura na peneira nº325
Κ'	Processo de compactação do empacotamento
K ₂ O	Óxido de potássio

L ₁	Média energética dos níveis de pressão sonora na sala de
	emissão
L	Média energética dos níveis de pressão sonora na sala de
L_2	recepção
М	Massa de madeira
ME	Massa específica
MgO	Óxido de magnésio
MU	Massa unitária
q	Coeficiente de distribuição
Relação a/agl (R _{a/agl})	Relação água/aglomerante
Relação a/c (R _{a/c})	Relação água/cimento
Relação a/g (R _{a/g})	Relação água/gesso
R _w	Índice de redução sonora ponderado
S	Área da abertura na qual a amostra é instalada
SiO ₂	Óxido de silício ou dióxido de silício ou sílica
SO ₃	Óxido sulfúrico ou anidrido sulfúrico
SrO	Óxido de estrôncio
Т	Tempo de reverberação na sala de recepção
U	Teor de umidade da madeira
u	Relação de vazios
V	Volume da sala de recepção
Уj	Volume de material de cada classe
β	Densidade de empacotamento
β_i	Densidade de empacotamento da classe dominante chamada i
βj	Densidade de empacotamento das demais classes chamadas j
γi	Densidade de empacotamento virtual
3	Índice de vazios
φ	Densidade de empacotamento efetiva
φ	Concentração de sólidos

SUMÁRIO

1.1 CONTENTO DO PROBLEMA PESQUISADO	1	INTRODUÇÃO	27
1.2 OBJETIVO 29 1.3 JUSTIFICATIVA 30 1.4 ESTRUTUR DA TESE 32 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 33 2.1 A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVIL 33 3.1 A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVIL 33 2.1 COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS 42 2.2 COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS 42 2.2.1 Compósitos de madeira com cimento POrtland 45 2.2 Compósitos de madeira com cimento POrtland 53 2.3.1 Desidade de empacotamento de partículas 54 2.3.2 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas 57 2.3.2.1 Métodos de compacotamento de partículas 57 2.3.2.2 Módelos aduiticos 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térnico 63 3.1 PARCAS DE VEDAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1 Aglome	1.1	CONTEXTO DO PROBLEMA PESQUISADO	28
1.3 JUSTIFICATIVA 30 1.4 ESTRUTURA DA TESE. 32 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 33 3.1 A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVIL 33 3.1.1 Residuos de construção e demolição de madeira 34 1.2 Os tipos de madeira e suas principais caracteristicas 38 2.1.2 Compósitos de madeira com gesso 50 2.2 Compósitos de madeira com gesso 50 2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 3.2.2 Módolos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas 56 2.3.2.1 Métodos e condelos dimanto de partículas 57 2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 58 2.3.2.2.1 Distribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2 Módelos modernos de construção 62 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 70	1.2	OBJETIVO	29
1.4 ESTRUTURA DA TESE. 32 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA. 33 2.1 A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVIL. 33 3.1.1 Resíduos de construção e demolição de madeira. 34 2.1.2 Os tipos de madeira e suas principais características. 38 2.1 Compósitos DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS. 42 2.1 Compósitos de madeira com cimento Portland 45 2.2.1 Compósitos de madeira com gesso 50 3.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 2.3.2.1 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento 56 2.3.2.1 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento 57 2.3.2.2 Mótodos e modeira cituas. 58 2.3.2.2.1 Nétodos e construção 62 2.4.2 VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propricadades e do desempenho mecânico, acústico e térnico 62 2.4.2 Utilização e	1.3	JUSTIFICATIVA	30
2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA 33 2.1 A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVIL 33 2.1.1 Residuos de construção e demolição de madeira 34 2.1.2 Os tipos de madeira cuas principais características 38 2.1 COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS 42 2.1 Compósitos de madeira com cimento Portland 45 2.2.2 Compósitos de madeira com gesso 50 2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 2.2.2 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas 56 2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento. 57 2.3.2.2 Modelos de construção 54 2.3.2.2 Modelos de construção 62 2.3.2.1 Distribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2 Odelos analiticos. 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização o avaliação das propriedades e do desempenho	1.4	ESTRUTURA DA TESE	32
2.1 A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVII. 33 2.1.1. Residuos de construção e demolição de madeira 34 2.1.2. Os tipos de madeira e suas principais características 38 2.2 COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS	2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1.1. Residuos de construção e demolição de madeira 34 2.1.2. Os tipos de madeira e suas principais características 38 2.2.1. Compósitos DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS 42 2.2.1. Compósitos de madeira com cimento Portland 45 2.2.2. Compósitos de madeira com cimento Portland 53 2.3. EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1. Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 2.3.2.1 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas. 57 2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento. 57 2.3.2.1 Mótodos modernos de construção 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS. 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 63 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térnico 63 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1. Cimento Portland 72 3.1.2 Gesso. 76 3.1.1. Aglom	2.1	A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVIL	33
2.1.2. Os tipos de madeira e suas principais características 38 2.2. COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS 42 2.2.1. Compósitos de madeira com cimento Portland 45 2.2.2. Compósitos de madeira com gesso 50 2.3. EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1. Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 2.3.2. Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas 56 2.3.2.1. Métodos experimentais de densidade de empacotamento 57 2.3.2.2. Modelos de angacotamento de partículas 57 2.3.2.2.1. Distribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2. Modelos analíticos 59 2.4. PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 62 2.4.1. Métodos modernos de construção 62 2.4.2. Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 63 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1. Aglomerantes 74 3.1.2. Aditivos químicos <td>2.1.1.</td> <td>Resíduos de construção e demolição de madeira</td> <td>34</td>	2.1.1.	Resíduos de construção e demolição de madeira	34
2.2 COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS	2.1.2.	Os tipos de madeira e suas principais características	38
2.2.1 Compósitos de madeira com cimento Portland 45 2.2.2 Compósitos de madeira com gesso 50 2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 2.3.2.1 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas 56 2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento 57 2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2 Libribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2.2.1 Distribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2 Ludelos analiticos 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 70 3.1.1 Cametones 72 3.1.1 Aglomerantes 72 3.1.1.1 Aglomerantes 72 3.1.1.2 <t< td=""><td>2.2</td><td>COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS</td><td>42</td></t<>	2.2	COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS	42
2.2 Compósitos de madeira com gesso 50 2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 2.3.2 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas 56 2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento 57 2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2.1 Distribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2.2Modelos analíticos 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 63 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 70 3.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1.2 Gesso 74 3.1.2 Gesso 74 3.1.2 Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.3.1 Obtenção dos reciclados 77 3.1.3.2 Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4 Papel Kraft pardo 88 3.2.5 Água 88 3.2.6 ESTUDO DA INFLUÊNC	2.2.1	Compósitos de madeira com cimento Portland	45
2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS 53 2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção 54 2.3.2 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas 56 2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento 57 2.3.2.2 Didoleos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2 Distribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2.2 Modelos analíticos 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térnico 63 7 PROGRAMA EXPERIMENTAL 70 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1.1 Cimento Portland 72 3.1.2 Gesso 74 3.1.2 Aditivos químicos 77 3.1.3.1 Obtenção dos reciclados 77 3.1.2 Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4 Papel Kraft pardo 88 3.2.5 Água <td>2.2.2</td> <td>Compósitos de madeira com gesso</td> <td>50</td>	2.2.2	Compósitos de madeira com gesso	50
2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção	2.3	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	53
2.3.2 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas	2.3.1	Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção	54
partículas 56 2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento. 57 2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2 IDistribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2 IDistribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2 IDistribuição granulométrica ótima 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 63 PROGRAMA EXPERIMENTAL 70 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1.1 Aglomerantes 72 3.1.1.2 Gesso 74 3.1.2 Aditivos químicos 76 3.1.3 Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.3 Détenção dos reciclados 77 3.1.3 Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4 Papel Kraft pardo 88 3.1.5 Água 88 3.2.1 Pródução dos compósitos 91	2.3.2	Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento	de
2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento 57 2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2.1 Distribuição granulométrica ótima 58 3.2.2.2 Modelos analíticos 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 63 70 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 70 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1.1 Cimento Portland 72 3.1.2 Gesso 74 3.1.2 Gesso 76 3.1.3 Obtenção dos reciclados 77 3.1.4 papel Kraft pardo 88 3.1.5 Água 88 3.1.5 Água 88 3.1.6 Kagua 88 3.1.7 Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4 Papel Kraft pardo 88 3.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS	partícula	as	56
2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas 57 2.3.2.2 IDistribuição granulométrica ótima 58 2.3.2.2 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS. 61 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS. 61 2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 70 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1 Aglomerantes 72 3.1.2 Gesso 74 3.1.2 Gesso 74 3.1.2 Gesso 74 3.1.2 Gesso 76 3.1.3 Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.3 Obtenção dos reciclados 77 3.1.3 Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4 Papel Kraft pardo 88 3.1.5 Água 88 3.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.1	2.3.2.1	Métodos experimentais de densidade de empacotamento	57
2.3.2.2.1 Distribuição granulométrica ótima. 58 2.3.2.2.2 Modelos analíticos. 59 2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS	2.3.2.2	Modelos de empacotamento de partículas	57
2.3.2.2.2Modelos analíticos	2.3.2.2.1	Distribuição granulométrica ótima	58
2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS	2.3.2.2.2	2Modelos analíticos	59
2.4.1 Métodos modernos de construção 62 2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico	2.4	PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS	61
2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico 63 PROGRAMA EXPERIMENTAL 70 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1. Cimento Portland 72 3.1.1.2. Gesso 74 3.1.2. Aditivos químicos 76 3.1.3. Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.4. Papel Kraft pardo 88 3.1.5. Água 88 3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS 88 3.2.1. Produção dos compósitos 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.2.4.4 Procedimentos de produção 94 3.2.5. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS 95 3.1.1. Proocedimentos de produção <td>2.4.1</td> <td>Métodos modernos de construção</td> <td>62</td>	2.4.1	Métodos modernos de construção	62
63 PROGRAMA EXPERIMENTAL 70 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1.2. Gesso. 74 3.1.2. Gesso. 74 3.1.2. Gesso. 74 3.1.2. Aditivos químicos 76 3.1.3. Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.3. Obtenção dos reciclados. 77 3.1.4. Papel Kraft pardo 88 3.1.5. Água. 88 3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.2.1. Produção dos compósitos 91 3.2.1.1. Obtenção das diferentes composições granulométricas 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.2.1.4. Procedimentos de produção 94 3.2.2. Ensaios realizados 94 3.3.1. Produção dos compósitos 99<	2.4.2	Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térm	ico
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 70 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1.2. Gesso 74 3.1.2. Aditivos químicos 76 3.1.3. Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.3.1. Obtenção dos reciclados 77 3.1.4. Papel Kraft pardo 88 3.1.5. Água 88 3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.2.1. Produção dos compósitos 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS 95 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1. Produção dos compósitos <td></td> <td></td> <td>.63</td>			.63
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 72 3.1.1. Aglomerantes 72 3.1.1. Gesso. 72 3.1.1.2. Gesso. 74 3.1.2. Aditivos químicos 76 3.1.3. Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.3. Potenção dos reciclados 77 3.1.4. Papel Kraft pardo 88 3.1.5. Água 88 3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.2.1. Produção dos compósitos 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.2.1.4. Procedimentos de produção 94 3.2.2. Ensaios realizados 94 3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS 95 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1. Produção dos compósitos	3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
3.1.1.Aglomerantes723.1.1.1.Cimento Portland723.1.1.2.Gesso743.1.2.Aditivos químicos763.1.3.Partículas de madeiras recicladas773.1.3.1.Obtenção dos reciclados773.1.3.2.Caracterização das partículas de madeira reciclada793.1.4.Papel Kraft pardo883.1.5.Água883.2.ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DASPARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS883.2.1.Produção dos compósitos913.2.1.1.Obtenção das diferentes composições granulométricas913.2.1.2.Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas913.2.1.3.Proporção dos materiais923.2.1.4.Procedimentos de produção943.3.ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EMCOMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS953.3.1.Produção dos compósitos993.3.1.1.Proporção dos materiais993.3.1.2.Procedimentos de produção993.3.1.2.Procedimentos de produção993.3.1.2.Procedimentos de produção993.3.1.2.Procedimentos de produção993.3.1.2.Procedimentos de produção913.3.1.2.Procedimentos de produção913.3.2.Procedimentos de produção913.3.1.2.Procedimentos de produção913.3.2.	3.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	72
3.1.1.1. Cimento Portland 72 3.1.1.2. Gesso. 74 3.1.2. Aditivos químicos 76 3.1.3. Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.3.1. Obtenção dos reciclados 77 3.1.3.2. Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4. Papel <i>Kraft</i> pardo 88 3.1.5. Água 88 3.1.6. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.2. Produção dos compósitos 91 3.2.1.1. Obtenção das diferentes composições granulométricas 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.2.1.4. Procedimentos de produção 94 3.2.2. Ensaios realizados 94 3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS 95 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1.1. Proporção dos materiais 99 3.3.1.2. Procedimentos de produção 99 3.3.1.2. Procedimentos de produção 99	3.1.1.	Aglomerantes	72
3.1.1.2. Gesso	3.1.1.1.	Cimento Portland	72
3.1.2. Aditivos químicos 76 3.1.3. Partículas de madeiras recicladas 77 3.1.3.1. Obtenção dos reciclados 77 3.1.3.2. Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4. Papel Kraft pardo 88 3.1.5. Água 88 3.1.6. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.2.1. Produção dos compósitos 91 3.2.1.1. Obtenção das diferentes composições granulométricas 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.2.1.4. Procedimentos de produção 94 3.2.2. Ensaios realizados 94 3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS 95 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1.2. Procedimentos de produção 99 3.3.1.2. Procedimentos d	3.1.1.2.	Gesso	74
3.1.3. Partículas de madeiras recicladas	3.1.2.	Aditivos químicos	76
3.1.3.1. Obtenção dos reciclados773.1.3.2. Caracterização das partículas de madeira reciclada793.1.4. Papel Kraft pardo883.1.5. Água883.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DASPARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS883.2.1. Produção dos compósitos913.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas913.2.1.3. Proporção dos materiais923.2.1.4. Procedimentos de produção943.2.2. Ensaios realizados943.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EMCOMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS953.3.1. Produção dos compósitos993.3.1.1. Proporção dos materiais993.3.1.2. Procedimentos de produção943.3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EMCOMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS953.3.1. Produção dos compósitos993.3.1.2. Procedimentos de produção903.3.1.2. Procedimentos de produção913.3.1.2. Procedimentos de produção91	3.1.3.	Partículas de madeiras recicladas	77
3.1.3.2. Caracterização das partículas de madeira reciclada 79 3.1.4. Papel Kraft pardo 88 3.1.5. Água 88 3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.2.1. Produção dos compósitos 91 3.2.1.1. Obtenção das diferentes composições granulométricas 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.2.1.4. Procedimentos de produção 94 3.2.2. Ensaios realizados 94 3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS 95 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1.1. Proporção dos materiais 99 3.3.1.2. Procedimentos de produção 101	3.1.3.1.	Obtenção dos reciclados	77
3.1.4. Papel Kraft pardo 88 3.1.5. Água. 88 3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS 88 3.2.1. Produção dos compósitos 91 3.2.1.1. Obtenção das diferentes composições granulométricas 91 3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas 91 3.2.1.3. Proporção dos materiais 92 3.2.1.4. Procedimentos de produção 94 3.2.2. Ensaios realizados 94 3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS 95 3.3.1. Produção dos compósitos 99 3.3.1.1. Proporção dos materiais. 99 3.3.1.2. Procedimentos de produção 101	3.1.3.2.	Caracterização das partículas de madeira reciclada	79
3.1.5.Água	3.1.4.	Papel <i>Kraft</i> pardo	88
3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS	3.1.5.	Água	88
PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS	3.2.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA	AS
3.2.1.Produção dos compósitos913.2.1.1.Obtenção das diferentes composições granulométricas913.2.1.2.Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas913.2.1.3.Proporção dos materiais923.2.1.4.Procedimentos de produção943.2.2.Ensaios realizados943.3.ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EMCOMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS953.3.1.Produção dos compósitos993.3.1.2.Procedimentos de produção101	PARTÍ	CULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS	88
3.2.1.1. Obtenção das diferentes composições granulométricas913.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas913.2.1.3. Proporção dos materiais923.2.1.4. Procedimentos de produção943.2.2. Ensaios realizados943.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EMCOMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS953.3.1. Produção dos compósitos993.3.1.2. Procedimentos de produção101	3.2.1.	Produção dos compósitos	91
3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas	3.2.1.1.	Obtenção das diferentes composições granulométricas	91
3.2.1.3. Proporção dos materiais	3.2.1.2.	Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas	91
3.2.1.4. Procedimentos de produção943.2.2. Ensaios realizados943.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EMCOMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS953.3.1. Produção dos compósitos993.3.1.1. Proporção dos materiais993.3.1.2. Procedimentos de produção101	3.2.1.3.	Proporção dos materiais	92
3.2.2. Ensaios realizados943.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS953.3.1. Produção dos compósitos993.3.1.1. Proporção dos materiais993.3.1.2. Procedimentos de produção101	3.2.1.4.	Procedimentos de produção	94
3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS	3.2.2.	Ensaios realizados	94
COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS	3.3.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE E	CM
3.3.1.Produção dos compósitos	COMP	ÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS	95
3.3.1.1. Proporção dos materiais	3.3.1.	Produção dos compósitos	99
3.3.1.2. Procedimentos de produção101	3.3.1.1.	Proporção dos materiais	99
	3.3.1.2.	Procedimentos de produção1	01

3.3.2.	Ensaios realizados
3.4.	ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECIC	LADAS 102
3.4.1	Estudo do empacotamento a partir da comparação das curvas granulométricas com
modelos	da literatura
3.4.1.1.	Comparação das curvas de distribuição granulométrica com os modelos 104
3.4.1.2.	Determinação experimental da densidade de empacotamento 104
3.4.1.3.	Previsão e determinação experimental da densidade de empacotamento para as curvas
de distri	buição granulométrica 105
3.4.2	Estudo do empacotamento a partir da aplicação do modelo de Alfred no
proporci	onamento dos materiais para a produção de compósitos 106
3.5.	ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL
INTER	NAS108
3.5.1.	Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e químicas110
3.5.1.1.	Produção das placas110
3.5.1.2.	Ensaios realizados 113
3.5.2.	Avaliação do desempenho mecânico, acústico e térmico114
3.5.2.1.	Produção das placas114
3.5.2.2.	Ensaios realizados
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES 127
4.1.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS
PARTÍ	CULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS127
4.1.1	Análise comparativa das composições granulométricas das partículas de madeira
reciclada	as
4.1.2	Análise da influência das composições granulométricas das partículas no estado
fresco	
4.1.3	Análise da influência das composições granulométricas das partículas no estado
endureci	ido132
4.2.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM
COMPO	ÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS140
4.2.1	Análise da influência do aditivo superplastificante no estado fresco140
4.2.2	Análise da influência do aditivo superplastificante no estado endurecido147
4.3.	ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA
RECIC	LADAS153
4.3.1	Estudo do empacotamento a partir da comparação das curvas granulométricas com
modelos	da literatura
4.3.1.1.	Comparação das curvas das composições granulométricas154
4.3.1.2.	Determinação experimental da densidade de empacotamento para cada classe de
tamanho	
4.3.1.3.	Predição e determinação experimental da densidade de empacotamento para as curvas
das com	posições granulométricas161
4.3.2	Estudo do empacotamento a partir da aplicação do modelo de Alfred no
proporci	onamento dos materiais para a produção de compósitos 166
4.4.	ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL
INTER	NA169
4.4.1.	Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e químicas169
4.4.2.	Avaliação do desempenho mecânico, acústico e térmico 200
4.4.2.1.	Avaliação do desempenho mecânico
4.4.2.2.	Avaliação do desempenho acústico
4.4.2.3.	Avaliação do desempenho térmico

5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	
5.1.	CONCLUSÕES	
5.1.1	Estudo da influência da distribuição granulométrica das partículas de madeir	
recicladas em compósitos		
5.1.2	Estudo da influência do aditivo superplastificante em compósitos com partículas de	
madeira	recicladas	
5.1.3	Estudo do empacotamento das partículas de madeira recicladas232	
5.1.4	Estudo do desempenho de placas de vedação vertical interna	
5.2.	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS 23	
5.3.	ARTIGOS DESENVOLVIDOS AO LONGO DESTE ESTUDO	
REFER	ÊNCIAS	
APÊND	DICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	
I - ANÁ	ÁLISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA	
DISTRI	BUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA EN	
COMPĆ	OSITOS	
II - AN	ÁLISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO	
ADITIV	O SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DI	
MADEI	RA FM COMPÓSITOS	
III - AN	ALISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO ESTUDO DO DESEMPENHO DI	
PLACA	S DE VEDAÇAU VERTICAL INTERNAS27	

1 INTRODUÇÃO

Resíduos de construção e demolição (RCD) superam 800 milhões de toneladas por ano na União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2017) e atingem cerca 45 milhões de toneladas por ano no Brasil (ABRELPE, 2017). Em 2010, a média da taxa de reciclagem de RCD nos países pertencentes à União Europeia atingiu 47% (PACHECO-TORGAL, 2013).

A reutilização de componentes e produtos de construção tem um efeito significativo no desempenho ambiental global do ciclo de vida da atividade de construção (CHEN, 2017; GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018), permitindo que, aproximadamente, 40% da energia incorporada seja poupada – apesar do aumento nas necessidades de transporte – e mais de 60% da emissão de carbono da estrutura de concreto seja salva ao reutilizar placas pré-fabricadas (ROTH; EKLUND, 2003), por exemplo. Desta maneira, pesquisadores acreditam que a sustentabilidade poderá ser alcançada a partir do momento em que a indústria da construção passar a reusar componentes ou a utilizar materiais renováveis ou reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição (CORREIA; ALMEIDA; FIGUEIRA, 2011).

Na construção civil, os resíduos de madeira geralmente são produzidos a partir das atividades relacionadas à execução dos projetos de edificações e de formas de concreto e, também, pelo descarte dos elementos utilizados para a segurança ocupacional e as instalações provisórias que se fazem necessárias nos canteiros de obras (RATAJCZAK *et al.*, 2015; KERN *et al.*, 2018).

No Brasil, a maior parte do uso de elementos em madeira é temporária, ainda que este material possa ser reutilizado inúmeras vezes durante a construção da edificação – dependendo das características do material e das estratégias do gerenciamento do canteiro de obras – pois é descartado ao término da construção, resultando em um ciclo de vida curto (KERN *et al.*, 2018).

Pesquisadores acreditam que os resíduos provenientes das formas para a moldagem de concreto nas edificações são os maiores responsáveis pela quantidade de resíduos de madeira gerados (LU *et al.*, 2011), representando de 8% a 30% de todo o volume de RCD produzido (POON; YU; JAILLON, 2004; BERGSDAL; BOHNE; BRATTEBO, 2007; KATZ, BAUM, 2010). Na Espanha, por exemplo, cerca de 4% do volume dos resíduos de construção e demolição, que foram destinados aos aterros, eram provenientes de madeira (LLATAS, 2013).

Ao considerar a reutilização ou a reciclagem deste material, é possível ainda reprocessá-los, transformando-os em materiais fibrosos e utilizando-os para a produção de novos produtos à base de madeira, como em compósitos (RAMAGE *et al.*, 2017). A

incorporação de materiais reciclados – como reforços de fontes renováveis – possibilitou o desenvolvimento de materiais alternativos capazes de atender também as demandas referentes às preocupações ambientais quando comparados aos compósitos poliméricos convencionais (LA MANTIA; MORREALE, 2011).

Por outro lado, a construção tradicional de paredes com blocos para fins de divisórias não estruturais entre ambientes tem sido substituída com sucesso por soluções e alternativas a partir de elementos pré-fabricados (FERREIRA *et al.*, 2016).

1.1 CONTEXTO DO PROBLEMA PESQUISADO

Resíduos de construção e demolição (RCD) têm sido um grande problema enfrentado pela indústria da construção em todo o mundo (AHMADIAN *et al.*, 2017; DING *et al.*, 2018), isto porque, cerca de 20% a 30% da massa de todo o material utilizado para a construção é desperdiçado (BANIHASHEMI; TABADKANI; HOSSEINI, 2018) – o que equivale a 26% do total de resíduos sólidos gerados nos EUA e 34% de todos os resíduos industriais na Europa (JIN *et al.*, 2017; PARK; TUCKER, 2017).

No Brasil, estima-se que a quantidade de resíduos de construção e demolição de madeira represente cerca de 31% do volume e de 10% da massa do total de resíduos produzidos para a construção de um edifício (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009).

Devido à falta de abordagens efetivas com relação à reciclagem no Brasil, quantidades significativas de resíduos de madeira geradas nos canteiros de obras foram utilizadas como combustível para queima ou descartados em aterros sanitários (MERCER; FROSTICK, 2012; WANG *et al.*, 2016). Em contrapartida, Jungmeier *et al.* (2002) e Kim e Song (2014) explicam que matérias-primas virgens podem ser substituídas por madeira reciclada contribuindo para a redução de custos e aos impactos associados à extração, ao transporte e ao descarte. Ng *et al.* (2014) e Souza *et al.* (2018) afirmam que a produção de compósitos contendo resíduos de madeira agrega valor aos produtos, além de promover vantagens econômicas e ambientais.

Em 2015, as Nações Unidas estabeleceram 17 objetivos que são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade (ONU BR, 2015). Neste contexto, dentre os objetivos propostos, destacam-se: o Objetivo 9 que trata de construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação; o Objetivo 11 que trata de tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos,

seguros, resilientes e sustentáveis; e, o Objetivo 12 que trata de assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (ONU BR, 2015).

Levando em consideração a quantidade de RCD de madeira que é gerada e a possibilidade de reutilizar esses resíduos para a produção de placas, questiona-se com esta tese:

Quais as propriedades e o desempenho de placas de vedação vertical internas – produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira contendo partículas de madeira provenientes de RCD – quando submetidas aos ensaios físicos e mecânicos das normas NBR 11675 (ABNT, 2016), NBR 14715-2 (ABNT, 2021) e NBR 15575-4 (ABNT, 2021), ao ensaio acústico da norma ISO 10140-2 (ISO, 2021) e ao ensaio térmico proposto por Franzen (2015)?

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa foi contribuir para o desenvolvimento das placas de vedação vertical interna com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira, a partir de partículas de madeira reciclada provenientes de RCD em sua composição, e avaliar as propriedades físicas e mecânicas, e de desempenho mecânico, acústico e térmico resultantes.

Foram estabelecidos, também, objetivos específicos, sendo estes:

- verificar a influência da distribuição granulométrica das partículas de madeira e da proporção aglomerante/madeira – nas propriedades no estado fresco e no estado endurecido – em compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira;
- verificar a influência do aditivo superplastificante e da proporção aglomerante/madeira – nas propriedades no estado fresco e endurecido – em compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira;
- verificar o empacotamento das partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD), comparando suas curvas granulométricas com modelos da literatura e avaliar sua influência nas proporções dos materiais necessários, para produzir compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira com maior densidade de empacotamento;
- avaliar as propriedades físicas e mecânicas de acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021); as propriedades químicas; o desempenho mecânico de acordo com a NBR 11675 (ABNT, 2016), a NBR 14715-2 (ABNT, 2021) e a NBR 15575-4 (ABNT, 2021); e o desempenho acústico de acordo com a ISO 10140-

2 (ISO, 2021), e o desempenho térmico (FRANZEN, 2015) de placas de vedação vertical interna, produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira.

1.3 JUSTIFICATIVA

A sustentabilidade no setor da construção civil tem sido considerada uma das necessidades iminentes do mundo em desenvolvimento (THOMAS, 2018). Isto porque, além deste setor representar 13% da economia global e de ser considerado um impulso fundamental para outras indústrias, devido à sua estreita integração a outras atividades (BANIHASHEMI; TABADKANI; HOSSEINI, 2018; HOSSEINI *et al.*, 2018), consome cerca de 40% da energia total, gera 30% das emissões de gases de efeito estufa e utiliza 17% dos recursos de água doce e agrava o desmatamento consumindo 25% da madeira colhida em todo o mundo (LI *et al.*, 2017). Além disso, utiliza 40% do total de matérias-primas extraídas globalmente e produz cerca de 35% do lixo mundial (DI MARIA; EYCKMANS; VAN ANCKER, 2018). É capaz de gerar, ainda, fluxos significativos de gases de efeito estufa e dióxido de carbono na atmosfera (DOBROVOLSKIENĖ *et al.*, 2017) resultante, também, da enorme produção de materiais de construção (PAVLÍKOVÁ *et al.*, 2018).

A indústria da construção civil, por ser considerada uma grande consumidora de recursos, pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de novas estratégias auxiliando para a mudança de um sistema de consumo linear para um circular. Desta maneira, uma estratégia de sustentabilidade considerada importante tem sido a incorporação de resíduos e subprodutos da fabricação de materiais de construção (MARQUES *et al.*, 2020).

O descarte de resíduos de construção e demolição (RCD) está diretamente associado ao rápido crescimento econômico das cidades e países em desenvolvimento (WANG *et al.*, 2016). Recentemente, a construção de edifícios e as atividades relacionadas à infraestrutura têm contribuído para a geração de quantidades significativas de resíduos de madeira (WANG *et al.*, 2016; HOSSAIN *et al.*, 2018). Estima-se que cerca de 26% da madeira recuperada seja apropriada para a reutilização (HOGLMEIER; WEBER-BLASCHKE; RICHTER, 2013) e, por isso, é fundamental transformar os resíduos de madeira em materiais com valor agregado (HOSSAIN *et al.*, 2018). A produção de materiais compósitos surge como uma alternativa para absorver os resíduos de madeira gerados pela construção civil (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Quando utilizados para a produção de placas de vedação, os compósitos produzidos com partículas de madeira e aglomerantes minerais apresentam baixa densidade e alta porosidade, contribuindo para a melhoria das propriedades de isolamento térmico e acústico. Entretanto, como o compósito é desenvolvido a partir do preenchimento das partículas de madeira pelo aglomerante inorgânico, a quantidade necessária de aglomerante tende a ser muito superior quando comparados aos painéis que utilizam resina em sua composição (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Diante disso, o empacotamento de partículas de madeira surge como uma ferramenta para contribuir na diminuição do consumo de aglomerante nos compósitos.

Estima-se que, somente na Austrália, a construção modular, que já é responsável por cerca de 3% dos métodos construtivos utilizados, aumente para aproximadamente 10% até 2030 (FERDOUS *et al.*, 2019), ou seja, a pré-fabricação dos elementos construtivos vem passando por um crescimento significativo (TUMMINIA *et al.*, 2018). Proporcionando a redução do tempo de construção dos empreendimentos – permitindo que diferentes frentes de trabalhos sejam executadas simultaneamente –, maior segurança e qualidade da fabricação dos elementos, além de contribuir para a diminuição do consumo de energia e do impacto ambiental do setor construtivo (LAWSON; OGDEN, 2010; LAWSON; OGDEN; BERGIN, 2012; TAVARES; LACERDA; FREIRE, 2019).

Estudos realizados pelo setor de construção do Reino Unido, demonstraram que sistemas modulares com estruturas em madeira e painelizados podem economizar até 51% de carbono incorporado e 35% de energia incorporada quando comparados aos métodos e materiais tradicionais de construção residencial (MONAHAN; POWEL, 2011). Outros pesquisadores (TENG *et al.*, 2018) acreditam ainda que a utilização de elementos préfabricados deve, em teoria, contribuir para a diminuição da pegada de carbono dos materiais e dos produtos, melhorando a eficiência dos processos de construção e, consequentemente, a qualidade das instalações produzidas.

Por fim, o desenvolvimento de materiais alternativos visando métodos de construção rápida tornou-se um fator importante para o desenvolvimento social, especialmente em países como a Argentina, o Brasil e o Chile – onde materiais produzidos com matéria-prima regional têm sido investigados para a construção de moradias em situações de emergência (QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016).

Neste sentido, este trabalho pretende contribuir no desenvolvimento de placas de vedação vertical internas – produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira

contendo partículas de madeira recicladas de RCD – utilizando como ferramenta o empacotamento das partículas e avaliando as propriedades e desempenho de acordo com as normas NBR 11675 (ABNT, 2016), NBR 14715-2 (ABNT, 2021) e NBR 15575-4 (ABNT, 2021), ISO 10140-2 (ISO, 2021) e ao ensaio térmico proposto por Franzen (2015).

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos no intuito de facilitar e organizar o entendimento do estudo realizado. O **Capítulo 1** abordou a introdução ao estudo, incluindo o contexto do problema pesquisado, o objetivo geral e os específicos da pesquisa e as justificativas.

O **Capítulo 2** engloba a contextualização teórica e o estado da arte dos temas abordados neste trabalho. Este possui quatro subitens em que são aprofundados os dados e os estudos relacionados à sustentabilidade e à construção civil; as definições, os tipos e as pesquisas desenvolvidas com os compósitos de madeira produzidos com aglomerantes minerais; a teoria, os diferentes métodos e modelos utilizados para determinar densidade de empacotamento de partículas; e as definições, os estudos relacionados ao desenvolvimento e ao desempenho de placas de vedação vertical interna.

No **Capítulo 3**, é detalhado o programa experimental desenvolvido neste estudo, incluindo a caracterização dos materiais, o estudo da influência da distribuição granulométrica das partículas de madeira e o estudo da influência do aditivo superplastificante em compósitos, o estudo do empacotamento das partículas de madeira, e o estudo do desempenho de placas de vedação vertical interna.

No **Capítulo 4**, estão apresentados os resultados e as discussões dos ensaios e procedimentos realizados conforme descrito no Capítulo 3. Por fim, no **Capítulo 5**, estão apresentadas as considerações finais que incluem as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Finalizando este trabalho, são apresentados, ainda, as **Referências Bibliográficas** e os **Apêndices**.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, estão abordados os temas que fundamentam e embasam o desenvolvimento deste estudo. A fundamentação teórica tem início com a contextualização da relação de dependência entre a sustentabilidade e a construção civil – incluindo a abordagem referente aos resíduos de construção e demolição (RCD) e as características básicas das madeiras como elemento construtivo –, seguida pela abordagem dos compósitos de madeira produzidos com aglomerantes minerais – contendo cimento Portland e gesso – e das teorias de densidade de empacotamento de partículas pertinentes a esta pesquisa. Por fim, é apresentado um panorama técnico referente às placas de vedação vertical internas – incluindo os métodos modernos de construção e a utilização e a avaliação de suas propriedades e do seu desempenho.

2.1 A SUSTENTABILIDADE E A CONSTRUÇÃO CIVIL

O conceito de sustentabilidade foi definido pela primeira vez em 1987, durante a Comissão Brundtland das Nações Unidas, como "um desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades" (DREXHAGE; MURPHY, 2010; SIEFFERT; HUYGEN; DAUDON, 2014), exigindo uma convergência entre os pilares do desenvolvimento econômico, equidade social e proteção (UNITED NATIONS, 2007; USMAN *et al.*, 2018).

A reciclagem continua sendo uma estratégia amplamente utilizada para reduzir o desperdício no contexto da construção (HAAS *et al.*, 2015), sendo que a incorporação de materiais reciclados em produtos de construção é uma das soluções benéficas de como reduzir o volume de resíduos descartados em aterros, contribuindo para reduzir o uso de matériasprimas minerais e diminuir a pegada de carbono da indústria da construção em todo o mundo (MEYER, 2009).

A reutilização e o aproveitamento de produtos reciclados são capazes de proporcionar benefícios ambientais (HOSSAIN *et al.*, 2018). A utilização de materiais naturais – submetidos a um processamento mínimo de produção – torna-se uma alternativa importante para o desenvolvimento de um ambiente saudável e sustentável (CERTINER; SHEA, 2018) e, por isso, é preciso que novos tipos de materiais de construção sejam produzidos no intuito de contribuir para a diminuição do impacto negativo proporcionado pela indústria de materiais de construção (SINKA *et al.*, 2018). Pesquisadores acreditam que estes materiais devem, além de

apresentar baixo impacto ambiental, contar com bons parâmetros tecnológicos que permitam uma adaptação econômica adequada e contribuir para a redução do consumo de energia durante a construção (CORINALDESI; MAZZOLI; SIDDIQUE, 2016; SINKA *et al.*, 2018).

2.1.1. Resíduos de construção e demolição de madeira

Resíduos de construção e demolição (RCD) é o termo utilizado para definir os resíduos gerados pelas atividades econômicas envolvendo a construção, a manutenção, a demolição e a desconstrução de edificios ou obras civis (GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018). A composição do RCD é considerada heterogênea, variando de acordo com o tipo de obra, de país para país, dependendo muito da técnica de construção e dos materiais empregados (BORGHI; PANTINI; RIGAMONTI, 2018; GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018). Pode incluir concreto, tijolos, telhas, misturas betuminosas, gesso, madeira, vidro, metais, plástico, solventes, amianto e solo (BORGHI; PANTINI; RIGAMONTI, 2018). A fração inerte não perigosa é a mais abundante (DEL RIO MERINO; GRACIA; AZEVEDO, 2009; BLENGINI; GARBARINO, 2010; DE MELO; GOLÇALVES; MARTINS, 2011) e, a partir desta, os produtos secundários podem ser recuperados, reutilizados ou reaproveitados na construção civil e em obras rodoviárias, em substituição ou em combinação com recursos minerais naturais (BORGHI; PANTINI; RIGAMONTI, 2018).

Entende-se por reciclagem o processo em que o material é desmontado e processado como matéria prima, atuando como substituto dos recursos naturais originais para a produção de um outro material de construção. Por outro lado, o reuso ou a reutilização podem ser definidos como método da reciclagem, em que os materiais podem ser reutilizados novamente sem a necessidade de alterar sua forma ou natureza. Neste cenário, o consumo de energia tende a ser baixo (GAO *et al.*, 2001; NG; CHAU, 2015).

Os resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser reutilizados ou reaproveitados como matéria-prima para a fabricação de materiais e/ou produtos (RODRIGUES *et al.*, 2013) como, por exemplo, agregados reciclados de resíduos de concreto (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2015), biocombustível a partir de resíduos de madeira (HOSSAIN; LEU; POON, 2016), aço secundário de aço sucatas, e outros materiais incluindo plásticos, papéis, vidro, alumínio (MERCANTE *et al.*, 2012).

Resíduos de madeira podem ser definidos como um material já utilizado por um período de tempo e que depois é descartado por seus usuários ou, então, pelos resíduos do

processamento primário da madeira como, por exemplo, a serragem. Esses resíduos têm sido acumulados ou descartados em todo o mundo, provocando preocupações relacionadas ao meio ambiente e à saúde (CORINALDESI; MAZZOLI; SIDDIQUE, 2016; MORALES-CONDE; RODRÍGUEZ-LIÑÁN; PEDREÑO-ROJAS, 2016; PEDREÑO-ROJAS *et al.*, 2017).

A madeira serrada abrange os produtos obtidos através do processamento mecânico da madeira *in natura* como, por exemplo, tábuas, pranchas, caibros, sarrafos, vigas, ripas e vigotes (IBÁ, 2017). Esses materiais têm sido utilizados tanto como um material de construção de longo prazo como temporário. Sua utilização de longo prazo é destinada a elementos estruturais – pilares ou vigas – e componentes de fechamento e vedação do edifício – painéis, janelas e portas. Enquanto, a utilização temporária dos elementos de madeira inclui a produção de formas para a moldagem do concreto, a confecção de escritórios e locais temporários para armazenamento de materiais nos canteiros de obras, e instalações relacionadas à segurança do trabalho – como andaimes e equipamentos de proteção coletiva (KERN *et al.*, 2018). A utilização de madeira é realizada, ainda, através de painéis de compensado (IBÁ, 2017).

Em Hong Kong, centenas de toneladas de resíduos de madeira, incluindo formas de madeira utilizadas na construção civil e paletes de madeira, têm sido descartadas diariamente em aterros sanitários (ENVIRONMENTAL PROTECTION DEPARTMENT, 2016). Para minimizar o impacto ambiental provocado pela geração de resíduos de madeira, o descarte destes em aterros deve ser considerado como última alternativa (KERN *et al.*, 2018). Isto porque, quando esses resíduos são destinados a aterros sanitários, ocorre a liberação de gases que contribuem para o efeito estufa, a lixiviação de contaminantes dos resíduos para o meio ambiente – como o arseniato de cobre cromado – poluindo a água ou o solo, demonstrando que a utilização do aterro não é sustentável (KIM; TOWNSEND, 2007; MERCER; FROSTICK, 2012; WANG *et al.*, 2017a; KERN *et al.*, 2018).

Também, durante o armazenamento de elementos, lascas ou serragem de madeira – ainda mais se estes se decompuserem rapidamente – ou através da geração de energia a partir da queima de subprodutos da madeira, uma grande quantidade de gases que contribuem para o efeito estufa pode ser liberada (WIHERSAARI, 2005; CORINALDESI; MAZZOLI; SIDDIQUE, 2016).

Por isso, a gestão dos elementos de madeira, cujo ciclo de vida esteja acabado ou cuja deterioração técnica/econômica os qualifique como resíduo, deve favorecer a sua reutilização ou a reciclagem da matéria-prima oriunda de florestas e contribuir para um desenvolvimento
sustentável (MANTAU; WEIMAR; KLOOCK, 2012; KLIMCZEWSKI; NICEWICZ, 2013; WRÓBLEWSKA *et al.*, 2014).

Assim, o rápido esgotamento dos recursos naturais e a necessidade de um manejo racional das reservas remanescentes – incluindo as matérias-primas renováveis –, a recuperação e o uso de resíduos gerados nos processos produtivos e de consumo; tornaram-se ainda mais importantes, além de surgir como uma estratégia atraente para o sequestro de carbono, contribuindo para a diminuição do aquecimento global (RATAJCZAK *et al.*, 2015; HOSSAIN *et al.*, 2018).

Os resíduos de madeira (FIGURA 2.1-1) são considerados como um recurso reutilizável ou reciclável (HOGLMEIER; WEBER-BLASCHKE; RICHTER, 2013) e, portanto, é necessário desenvolver e aprimorar tecnologias inovadoras e ecológicas capazes de transformar os resíduos de madeira em materiais com valor agregado (HOSSAIN *et al.*, 2018). Estima-se que, aproximadamente, 26% da madeira recuperada é adequada para a reutilização ou reciclagem (HOGLMEIER; WEBER-BLASCHKE; RICHTER, 2013).



FIGURA 2.1-1 – RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO DEMOLIÇÃO (RCD) DE MADEIRA

FONTE: A autora (2023).

Desta maneira, as matérias-primas virgens podem ser substituídas por madeira reciclada contribuindo para a redução dos custos e demais peculiaridades associadas à extração, transporte e descarte (JUNGMEIER *et al.*, 2002; KIM; SONG, 2014). Além disso, viabiliza a produção de compósitos de madeira, de aglomerados, de biocombustível (NG *et al.*, 2014), agregando valor aos produtos e, consequentemente, promovendo vantagens econômicas e ambientais para as empresas que, ao invés de descartá-los, são capazes de transformar os resíduos (SOUZA *et al.*, 2018).

Portanto, diversos países concentram seus esforços para encontrar alternativas viáveis aos materiais utilizados na construção civil e visam desenvolver produtos com um melhor desempenho em termos de energia e de sustentabilidade (FIGURA 2.1-2).

FIGURA 2.1-2 – PRODUTOS DESENVOLVIDOS CONTENDO RESÍDUOS DE MADEIRA



FONTE: USMAN *et al.* (2018), CORINALDESI, MAZZOLI e SIDDIQUE (2016), SOUZA *et al.*, 2018. LEGENDA: (a) Pasta auto-adensável contendo serragem, (b) Argamassa contendo serragem, e (c) Colchão de partículas - pré-prensagem – para a obtenção de painéis de partículas.

Estudos demonstraram que a fibra vegetal é um material útil na transformação e na reciclagem dos resíduos e, que podem ser empregadas em elementos de construção rentáveis, com baixa energia incorporada e adequada para esta finalidade (SAVASTANO JR. *et al.*, 2016).

A incorporação de resíduos de madeira em painéis aglomerados com cimento, por exemplo, foi proposta como uma tecnologia atraente para solidificar e estabilizar materiais contaminados (WANG; TSANG, 2018) – como produtos químicos conservantes, tintas a óleo, adesivos – além de incentivar o desenvolvimento de produtos com valor agregado capazes de capitalizar os méritos da madeira e do cimento – incluindo a leveza, alta tenacidade, estabilidade dimensional, resistência ao fogo, propriedades antibacterianas, isolamento acústico e térmico (ASHORI; TABARSA; AMOSI, 2012; WANG *et al.*, 2017b).

Materiais contendo resíduos vegetais são capazes, ainda, de sequestrar o dióxido de carbono presente na atmosfera através da fotossíntese e, consequentemente, quando utilizado como elemento construtivo, reduzir o dióxido de carbono incorporado em uma edificação (LAWRENCE *et al.*, 2013). Quando utilizados de forma adequada podem, também, apresentar um desempenho de isolamento acústico e térmico comparável a outros materiais de isolamento, entretanto, com uma menor pegada de carbono e com menos problemas de saúde relacionados à sua instalação (SUTTON; BLACK; WALKER, 2011).

2.1.2. Os tipos de madeira e suas principais características

Poucos materiais de construção possuem os benefícios ambientais proporcionados pela madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Embora tenha sido sucessivamente substituída pelo concreto e pelo aço, ao longo dos anos, a madeira ainda tem sido um dos materiais de construção mais utilizados (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; RAMAGE *et al.*, 2017; USMAN *et al.*, 2018). Diferente das tendências do passado, a madeira é considerada, atualmente, como um recurso extremamente valioso por se tratar de um biopolímero natural ecologicamente correto e relativamente barato, renovável e biodegradável com baixa emissão de carbono (LI; LI, 2018; LUKAWSKI *et al.*, 2018; MIKAC *et al.*, 2018). Além disso, apresenta disponibilidade regular, boa usinabilidade e excelentes propriedades mecânicas (isto é, alta resistência e tenacidade) com baixa densidade (devido à sua alta porosidade e à sua estrutura de poros celulares) (ZHU *et al.*, 2016; YADDANAPUDI *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2018).

Devido à sua estrutura, disponibilidade e diferenças geográficas, a madeira é classificada em dois grupos principais (YADDANAPUDI *et al.*, 2017). Os grupos formadores de árvores mais abundantes pertencem à classe das angiospermas que são caracterizadas pelas plantas que produzem flores e sementes fechadas, enquanto a classe das gimnospermas são caracterizadas pelas plantas que produzem sementes descobertas.

Industrialmente, as madeiras obtidas a partir das angiospermas – ou seja, as dicotiledôneas que, geralmente, apresentam folhas largas decíduas são denominadas folhosas (FIGURA 2.1-3a) e as madeiras obtidas a partir das gimnospermas são as coníferas (FIGURA 2.1-3b) (KOLLMANN; CÔTÉ JR., 1968; ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; RAMAGE et al., 2017). Existem mais de 500 espécies de coníferas e mais de 12.000 espécies de folhosas em todo o mundo (BAJPAI, 2018).



FONTE: Adaptado de KOLLMANN e CÔTÉ JR. (1968).

As fibras, por serem consideradas células ocas, contribuem para a baixa da densidade da madeira quando secas. Além disso, outra estratégia da natureza foi construir as células da madeira não como células simétricas, mas como tubos fortemente alongados – os traqueídes – que contribuem para a elevada rigidez da madeira na direção da carga longitudinal, ou seja, um elevado módulo de elasticidade e maior resistência à tração e à compressão na direção longitudinal do que transversalmente (STANZL-TSCHEGG, 2011). Isto ocorre por influência da ortotropia presente na madeira capaz de torná-la, dentre outras razões, uma estrutura complexa.

É importante destacar, ainda, que os principais fatores naturais que contribuem para a alteração das propriedades físicas e mecânicas são: a espécie botânica, a densidade do material, a localização da peça no lenho, a presença de defeitos e a umidade. Enquanto os principais fatores tecnológicos são: a forma e as dimensões dos corpos de prova, a orientação das solicitações em relação aos anéis de crescimento, e a velocidade de aplicação das forças nas solicitações mecânicas (BAUER, 2019).

Dentre as características físicas da madeira, pode-se considerar que as principais são: a umidade, a estabilidade dimensional, a densidade, a condutibilidade elétrica – quando seca a madeira é isolante, quando úmida é condutora –, a condutibilidade térmica – a madeira é um mau condutor pois sua estrutura celular é capaz de aprisionar inúmeras pequenas massas de ar, além de ser composta de celulose que também é má condutora de calor –, a condutibilidade sonora – devido à sua baixa densidade, a madeira tende a contribuir apenas para uma pequena redução sonora, entretanto, apresenta-se como um excelente material para a absorção acústica – e a resistência ao fogo (BAUER, 2019).

A densidade pode ser considerada uma das mais importantes propriedades físicas da madeira, isto porque, para um mesmo teor de umidade, é possível correlacionar propriedades mecânicas, dureza, resistência à abrasão (KOLLMANN; CÔTÉ JR., 1968). A densidade de determinada espécie pode ser superior à outra por possuir maior quantidade de células com paredes grossas (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Quimicamente, a madeira é composta por quatro elementos principais – a celulose, a hemicelulose, a lignina e os extrativos – que representam de 97% a 99% do peso total da madeira. A celulose – que representa de 40% a 50% da madeira – é composta por cadeias longas de moléculas de polissacarídeos contendo glicose, já as cadeias de moléculas de polissacarídeos de baixo peso molecular são denominadas hemiceluloses – que representam de 25% a 35% da madeira. A lignina – que representa de 20% a 30% da madeira –, por sua vez, atua como uma cola que contribui para a união de todas as células da madeira, fornecendo à parede celular rigidez e resistência à compressão, formando uma estrutura compacta. Por fim, os extrativos – que representam de 20% a 30% da madeira – consistem em uma série de compostos orgânicos presentes nas madeiras que confere coloração e durabilidade natural à madeira, tais como óleos

e minerais orgânicos (KOLLMANN; CÔTÉ JR., 1968; ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; RAMAGE *et al.*, 2017; YADDANAPUDI *et al.*, 2017). Variações nas características e nas proporções desses componentes, além da diferença na estrutura celular, tornam as madeiras pesadas ou leves, rígidas ou flexíveis, duras ou macias (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Ainda quanto à composição química da madeira, é importante destacar que a hidroxila e outros grupos de polímeros da parede celular da madeira contendo oxigênio tendem a atrair e reter a umidade através das ligações de hidrogênio. A absorção da umidade pela madeira pode provocar alterações dimensionais prejudicando a sua durabilidade (RAMAGE *et al.*, 2017).

A madeira, quando utilizada em ambiente externo, é exposta a agentes atmosféricos – principalmente radiação solar e chuva – que degradam sua superfície. Nessas condições, as alterações na camada superfícial da madeira são provocadas pelo colapso da lignina e de outros constituintes por radiação ultravioleta e sua subsequente remoção pela ação da chuva, associada à perda de produtos solúveis em água. A exposição prolongada às repetidas variações de temperatura e umidade do ar ambiente sujeitarão a madeira a ciclos úmidos e secos, com o inchamento e a retração correspondentes criando rachaduras e fissuras (TSOUMIS, 1991; CUSTÓDIO; EUSÉBIO, 2006).

Por se tratar de um material poroso e higroscópico, a água presente na madeira assume duas formas – a água livre e a água higroscópica. A água livre encontra-se em estado líquido ou de vapor nas cavidades celulares – os lúmens – enquanto a água aprisionada constitui a parede celular (MIKAC *et al.*, 2018). As mudanças dimensionais causadas pela presença de água livre são geralmente insignificantes e, por isso, o principal fator que influencia a higroexpansão é a mudança na quantidade de água aprisionada (SKAAR, 1988).

Quando a madeira se encontra seca, ou seja, com teor de umidade entre 0% e 30% (este último considerado como o ponto de saturação das fibras – PSF) a água predominante é a água presente nas paredes celulares ligada quimicamente. Ao atingir o PSF, as paredes celulares da madeira encontram-se completamente preenchidas de água enquanto os lúmens estão completamente vazios. Acima deste valor, passa a existir também a água livre – presente nos lúmens (MIKAC *et al.*, 2018). É importante destacar, também, que quando a madeira está seca tende a apresentar bom isolamento além de propriedades contra o calor – a condutividade térmica da madeira é muito inferior à dos metais, por exemplo –, assim como o som e a eletricidade (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Diferente da maioria dos materiais higroscópicos, a madeira apresenta alteração dimensional e volumétrica provocadas pela alteração do teor de umidade (CAVE, 1972; GEREKE; NIEMZ, 2010; HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015). Essas alterações dimensional e volumétrica – caracterizadas pelo inchamento ou contração – são capazes de provocar uma expansão ou contração do volume que pode induzir – ou não – a tensões mecânicas na madeira (CHOMCHARN; SKAAR, 1983; MA *et al.*, 2010).

A instabilidade dimensional da madeira, em resposta à absorção e à perda de água, é considerada como uma das principais desvantagens e limitações para sua utilização como material construtivo (TAIB; JULKAPLI, 2019). Diversas alternativas foram desenvolvidas para minimizar o efeito da anisotropia, aumentando a estabilidade dimensional da madeira como, por exemplo, a formação da madeira compensada (WOOD *et al.*, 2018).

Visando uma vida útil prolongada, os elementos de madeira devem ser utilizados na seguinte ordem de prioridade: em produtos à base de madeira, reutilizados, reciclados, como fonte de bioenergia e, por fim, eliminados (EUROPEAN COMMISSION, 2013; RAMAGE *et al.*, 2017).

2.2 COMPÓSITOS DE MADEIRA COM AGLOMERANTES MINERAIS

Compósitos podem ser definidos como materiais multifásicos compostos por dois ou mais constituintes, com propriedades físicas e/ou químicas diferentes, combinados no intuito de otimizar uma ou mais propriedades específicas (KAW, 2006; ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010). Os materiais compósitos geralmente apresentam melhores propriedades que seus constituintes originais. Entretanto, a quantidade de combinações possíveis e a razão entre seus constituintes, as formas de ligação e as interações de interface, a forma e a orientação dos seus constituintes, tornam um verdadeiro desafio prever e projetar as propriedades de um compósito, mesmo que as propriedades de seus constituintes sejam conhecidas (VASILIEV; MOROZOV, 2001).

Desde a Segunda Guerra Mundial, os materiais compósitos reforçados – caracterizados por serem compostos por uma fase de reforço embutida numa matriz contínua – passaram a ser cada vez mais utilizados (KONCAR, 2019).

A matriz é considerada o componente principal no material compósito. Isto porque, este desempenha a função de proteger as fibras contra a abrasão e às condições adversas, por exemplo. Além disso, mantém as fibras fixas, contribuindo para a resistência do compósito, sendo capaz de absorver energia através da deformação (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; MITTAL *et al.*, 2018; KONCAR, 2019). Quando uma carga é aplicada em um material compósito, é a matriz que transfere e distribui a carga ao material de reforço (SONNENFELD *et al.*, 2017; MITTAL *et al.*, 2018). A matriz, geralmente, é responsável pelas propriedades elétricas, químicas e térmicas do compósito (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010). O reforço, por sua vez, é responsável por desempenhar as propriedades de rigidez e de resistência da estrutura e, geralmente, são utilizados nas formas de partículas, flocos ou fibras (KAW, 2006).

Diversos estudos relatam que as propriedades finais dos compósitos estão relacionadas às diversas características das fibras, tais como: tipo, comprimento, diâmetro, fração volumétrica, estrutura, agente de colagem, morfologia, orientação e ligação entre as fibras e a matriz (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; MITTAL *et al.*, 2018). As propriedades do material compósito tendem a aumentar proporcionalmente à quantidade de fibras na matriz (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010), entretanto, após atingir certo limite, a presença de fibras se torna prejudicial e as propriedades do material começam a diminuir devido ao fraco intertravamento mecânico que prejudica a transferência de carga entre as fibras e a matriz (ROJO *et al.*, 2015; KECK; FULLAND, 2016).

As fibras podem ser introduzidas na matriz em diferentes orientações como fibras curtas orientadas aleatoriamente – fornecendo ao compósito um comportamento isotrópico –, como arranjos unidirecionais longos ou contínuos – fornecendo ao compósito um comportamento anisotrópico, com resistência e rigidez boas e paralelas às fibras –, ou como fibras longas e contínuas introduzidas em diferentes direções – proporcionando boa resistência em duas direções perpendiculares (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010).

Em compósitos particulados, certas propriedades dependem apenas das quantidades e das propriedades relativas aos seus constituintes individuais. A regra da mistura explica que as propriedades de um compósito – tais como a densidade, as propriedades elétricas e térmicas e o módulo de elasticidade – serão equivalentes às propriedades de cada constituinte considerando suas respectivas frações volumétricas. Entretanto, em compósitos produzidos com fibras não contínuas ou unidirecionais, a regra das misturas pode não se aplicar (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010).

Quando comparadas com as fibras artificiais, as fibras naturais apresentam maior disponibilidade, menor custo, e menor impacto ambiental, além de consumirem menor quantidade de energia para ser produzidas. Apesar disso, as fibras de madeira não são homogêneas e constantes como as fibras artificiais, pois apresentam variação dimensional na presença de água e têm menor resistência à tração (BELTRAN; SCHLANGEN, 2009). As propriedades mecânicas dos compósitos produzidos com fibras naturais – principalmente a resistência à tração – dependem diretamente do grau de adesão entre a superfície da fibra natural e a superfície da matriz (EKICI; KENTLI; KÜÇÜK, 2012; SOOD; DWIVEDI, 2018) e, para isto, tratamentos químicos e físicos podem ser aplicados às fibras (SOOD; DWIVEDI, 2018).

Diferentes compósitos contendo madeira ou fibras vegetais têm sido desenvolvidos, entre eles compósitos de plástico-madeira (ASHORI; BEHZAD; TARMIAN, 2013; SANTONI *et al.*, 2018), de borracha-madeira (SONG; HWANG, 1997; ZHAO *et al.*, 2013), de poliuretano-madeira (GU; SAIN; KONAR, 2013; TIUC *et al.*, 2019), por exemplo.

Combinar a madeira com materiais inorgânicos para a produção de compósitos é uma alternativa para desenvolver materiais sustentáveis, reduzir os custos com matéria-prima – inserindo um material de menor custo como enchimento ou reforço –, utilizar materiais reciclados, e produzir produtos com propriedade superior ao dos seus constituintes individualmente. Como o compósito é obtido a partir do preenchimento das partículas de madeira pelo aglomerante inorgânico, este se torna uma matriz contínua e, por isso, difere dos compósitos produzidos com resina – em que as partículas de madeira são "conectadas por pontos". Consequentemente, além da densidade do aglomerante inorgânico ser superior à maioria das resinas termofixas, a quantidade necessária de aglomerante por unidade de volume de madeira é, também, muito superior (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Por outro lado, compósitos produzidos com aglomerantes inorgânicos não precisam de fonte de calor no processo produtivo para realizar a cura. Esta peculiaridade proporciona maior versatilidade para a produção destes compósitos, permitindo a produção em grande escala com mão-de-obra não qualificada. A partir do momento que a demanda por esses materiais aumentar, é possível investir em tecnologia e tornar o processo produtivo mais sofisticado. Dentre os aglomerantes mais utilizados, pode-se destacar o cimento Portland, o cimento de magnésia e o gesso. Estes dois últimos devido à sensibilidade à água, são utilizados apenas em aplicações internas (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

O presente trabalho tem o intuito de aprofundar o conhecimento aos compósitos de madeira produzidos com aglomerantes minerais como o cimento Portland e o gesso.

2.2.1 Compósitos de madeira com cimento Portland

Os compósitos de cimento Portland e madeira são materiais produzidos a partir da união de fibras ou partículas de madeira com aditivos químicos – quando necessário – e um aglomerante inorgânico, neste caso, o cimento (ASHORI; TABARSA; SEPAHVAND, 2012; NASSER *et al.*, 2016). As partículas de madeira representam o agregado ou o agente de reforço, o cimento é o aglomerante, a água é o reagente e os aditivos podem ser considerados os catalisadores (ASHORI; TABARSA; SEPAHVAND, 2012). Geralmente, os compósitos contêm de 10% a 70% de fibras ou partículas de madeira e de 90% a 30% de aglomerante inorgânico (em massa) (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Diversos estudos têm sido realizados no intuito de aprimorar e desenvolver novos compósitos de cimento-madeira (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016), isto porque, nas últimas décadas, devido ao aumento da preocupação ambiental além da crescente demanda por materiais ecologicamente corretos (CÉLINO *et al.*, 2014) e do alto custo das fibras sintéticas – como fibras de carbono e de vidro –, os materiais de base biológica tornaram-se um substituto comum para o reforço em diferentes tipos de compósitos (KIDALOVA *et al.*, 2012). Estes compósitos permitem, ainda, a substituição de adesivos orgânicos – como fenóis e formaldeídos, por exemplo – utilizados com frequência para a produção de materiais à base de madeira particulada (MOSLEMI, 1999).

É importante destacar que as partículas de madeira são uma alternativa interessante para produzir compósitos cimentícios por serem adquiridas de fontes renováveis, pelo seu baixo custo quando comparadas às fibras sintéticas, pela sua natureza não abrasiva, por ser biodegradável, por sua baixa densidade e alta porosidade, por sua ampla variedade, entre outras características (ASHORI *et al.*, 2011; TABARSA; JAHANSHAHI; ASHORI, 2011; ONUAGULUCHI *et al.*, 2014). Compósitos cimentícios produzidos com fibras ou partículas de madeira tendem a apresentar baixa densidade, boa resistência ao fogo e à água, boas propriedades de isolamento térmico e acústico, boa tenacidade e ductilidade, boa resistência à degradação biológica e baixo custo (FRYBORT *et al.*, 2008; KRÜGER *et al.*, 2009; ASHORI *et al.*, 2011; BENTCHIKOU *et al.*, 2012).

Entretanto, apesar dos inúmeros benefícios relacionados à combinação entre as partículas de madeira e o cimento, os constituintes químicos da madeira influenciam na hidratação do cimento e tendem a provocar a incompatibilidade entre estes dois materiais (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; FAN *et al.*, 2012).

O cimento Portland é composto por quatro fases principais: a alita (silicato tricálcico – Ca₃SiO₅), a belita (silicato dicálcico – Ca₂SiO₄), o aluminato (aluminato tricálcico – Ca₃Al₂O₆), e a ferrita (aluminoferrito de tetracálcico – Ca₂AlFeO₅) (TAYLOR, 1990). Na presença de água, os silicatos e os aluminatos formam produtos de hidratação que ao longo do tempo produzem uma massa resistente (NEVILLE, 2011). Entretanto, as reações químicas que ocorrem são mais complexas do que a simples conversão entre os compostos anidros em hidratos (TAYLOR, 1990). Independente do modo em que ocorrem as precipitações dos produtos hidratados, a taxa de hidratação tende a diminuir continuamente, de modo que, após um longo período, ainda existirão quantidades de cimento a serem hidratadas (NEVILLE, 2011).

Dentre os diferentes tipos de cimentos comercializados, o Cimento Portland CP-V ARI (Alta Resistência Inicial) caracteriza-se por desenvolver sua resistência mais rapidamente quando comparado aos demais. Isto ocorre devido à maior quantidade de alita (C₃S) presente em sua composição e, também, pela moagem mais fina do clínquer no cimento (TAYLOR, 1990; NEVILLE, 2011). Esse cimento é indicado para situações em que o rápido desenvolvimento da resistência é necessário, geralmente quando as formas devem ser retiradas rapidamente ou quando a resistência do elemento construtivo é exigida precocemente (TAYLOR, 1990; NEVILLE, 2011). Além disso, o cimento CPV ARI tem sido considerado o cimento mais adequado para a produção de compósitos com madeira (LATORRACA, 2000; MATOSKI, 2005; LIMA, 2009; VILLAS-BÔAS, 2016).

Em compósitos produzidos com cimento Portland e madeira, alguns pesquisadores explicam que, na presença de água, quando a partícula de madeira se encontra com o teor de umidade extremamente baixo, parte da água disponibilizada para a hidratação do cimento tende a ser absorvida pelas partículas. Por outro lado, caso as partículas de madeira estejam excessivamente saturadas, a migração de extrativos solúveis em água é favorecida (KALIA; KAITH; KAUR, 2009). Com o excesso de água da mistura, a relação água/cimento (a/c) final da pasta será aumentada, provocando a dissolução dos extrativos e contribuindo para o desenvolvimento de baixas resistências (MIYATAKE *et al.*, 2000).

Quimicamente, nem todos os tipos de madeira são compatíveis com o cimento, isto porque, alguns componentes presentes nas madeiras podem provocar um retardamento da hidratação do cimento diminuindo, até mesmo, as propriedades mecânicas do material e sua durabilidade (HACHIMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990; MILLER; MOSLEMI, 1991).

Pesquisadores explicam que a compatibilidade entre o cimento e as partículas de madeira, geralmente, diminui à medida que a quantidade de extrativos aumenta (ASHORI; HAMZEH; AMANI, 2011). Esses extrativos – compostos por ácidos graxos, taninos, carboidratos, açúcares, sacarose e materiais inorgânicos – quando solúveis em água, são capazes de retardar e até mesmo inibir o desenvolvimento da hidratação do cimento e o seu endurecimento (ASHORI; HAMZEH; AMANI, 2011; FAN *et al.*, 2012).

Não se sabe, com precisão, qual o mecanismo que causa a incompatibilidade entre a madeira e o cimento, porém existem duas teorias que vêm sendo propostas. Alguns pesquisadores relatam que os extrativos solúveis em água interagem com os íons Ca²⁺ presentes na matriz cimentícia, alterando a cinética de hidratação do cimento que terá a formação de seus hidratos interrompida (NOZAHIC *et al.*, 2012; DOUDART DE LA GRÉE; YU; BROUWERS, 2017). Outros explicam que as substâncias inibitórias promovem a formação de membranas impermeáveis ao redor dos grãos de cimento não-hidratados, impedindo a absorção, retardando o processo de hidratação e, consequentemente, a formação de um dos principais hidratos do cimento, o C-S-H (BRUERE, 1966; THOMAS; BIRCHALL, 1983; JUENGER; JENNINGS, 2002). Desta maneira, os compósitos produzidos com cimento e madeira tendem a apresentar atrasos no tempo de início e de fim de pega (GOVIN; PESCHARD; GUYONNET, 2006; NOZAHIC *et al.*, 2012) e, também, diminuição das propriedades mecânicas (ASHORI *et al.*, 2011).

Além disso, muitos estudos relacionaram a presença do hidróxido de sódio da matriz cimentícia com a degradação da fibra vegetal e, consequentemente, com a perda de durabilidade do compósito (TOLÊDO FILHO *et al.*, 2000; AGOPYAN *et al.*, 2005; ARDANUY *et al.*, 2011; TONOLLI *et al.*, 2011).

Para minimizar os prejuízos provocados pela incompatibilidade entre as partículas de madeira e o cimento Portland, duas alternativas são utilizadas com frequência (MOSLEMI; GARCIA; HOFSTRAND, 1983; PLEKHANOVA *et al.*, 2007; OLORUNNISOLA, 2008; NAZERIAN; GOZALI; GHALEHNO, 2011; NA *et al.*, 2014; CASTRO, 2015; NASSER *et al.*, 2016): a primeira refere-se aos diferentes pré-tratamentos que podem ser realizados nas partículas de madeira – tais como tratamentos térmicos, extração em água quente ou em água fria, entre outros –, e a segunda refere-se aos aditivos químicos, principalmente aceleradores de pega, que podem ser utilizados para a produção dos compósitos – tais como hidróxido de cálcio, cloreto de cálcio, silicato de sódio, sulfato de alumínio, entre outros.

O comportamento da interface entre as partículas de madeira e a matriz cimentícia dependem do tipo da madeira, da composição da matriz, das condições de cura, e da geometria e das dimensões das partículas (BELTRAN; SCHLANGEN, 2009). Outros pesquisadores relatam que o comportamento higroscópico da madeira também influencia no mecanismo de ligação entre estes dois materiais, uma vez que, a madeira tende a determinar a quantidade de água que será disponibilizada para a hidratação do cimento (COUTTS; KIGHTLY, 1984; WEI *et al.*, 2004).

Latorraca e Iwakiri (2000) e Fan *et al.* (2012) verificaram que as espécies de coníferas, principalmente a do gênero Pínus, são as madeiras mais utilizadas para a produção dos painéis de cimento-madeira, pois apresentam boa compatibilidade com o cimento. Entretanto, outros pesquisadores, realizaram testes de hidratação com seis diferentes espécies com o cimento e verificaram que o eucalipto e a seringueira também podem ser considerados espécies adequadas para a produção de painéis com cimento. Mendes *et al.* (2017) ao avaliarem a influência de diferentes tipos de insumos lignocelulósicos – resíduos de Pínus, resíduos de Eucalipto, bagaço de cana de açúcar e bambu – no desempenho de painéis produzidos com cimento, observaram que os painéis produzidos com resíduos de Eucalipto apresentaram os melhores desempenhos para todas as propriedades físicas e mecânicas. Nesse estudo verificaram ainda que as dimensões e a geometria das partículas afetaram as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, pois os painéis produzidos com as partículas maiores obtiveram um melhor desempenho.

Outros pesquisadores (TONOLI *et al.*, 2010a; TONOLI *et al.*, 2010b; ALMEIDA ANDIÇ-ÇAKIR *et al.*, 2013), em diversos estudos realizados, obtiveram sucesso ao produzir seus compósitos tanto com polpa de pínus como com polpa de eucalipto – adotando teores de 4 a 10% com relação à massa do aglomerante. Soroushian *et al.* (2006) verificaram que as partículas de madeira *softwood* (coníferas) proporcionavam melhorias nas propriedades de resistência à flexão e na tenacidade, enquanto as fibras de *hardwood* (folhosas), por possuírem comprimentos menores, apresentaram um pior desempenho, mas, ainda assim, superior às partículas recicladas. Isto porque, o comprimento da partícula é capaz de limitar a propagação da fissura no compósito.

Em compósitos cimentícios produzidos com serragem de junco e coníferas comuns, Boltryk e Pawluczuk (2014) obtiveram resultados de densidade aparente em torno de 900 kg/m³ indicando que o compósito possa ser utilizado como material isolante de acordo com a norma europeia EN 12390-7. Além disso, como a resistência à compressão destes compósitos atingiu cerca de 3MPa ou 4 MPa, é possível utilizá-lo como parede estrutural para edifícios de até dois andares, conforme especificado pela norma europeia EN 12390-3.

No estudo realizado por Karade, Irle e Maher (2006) foi verificado que quanto menor a partícula de cortiça, maior é a área superficial e, consequentemente, maior é a quantidade de extrativos livres na mistura. Além disso, cada espécie de madeira possui diferentes tipos e quantidades de extrativos de madeira, provocando diferentes efeitos sobre a hidratação do cimento (NA *et al.*, 2014).

Ao avaliar compósitos produzidos com diferentes proporções de partículas de madeira, Mansur e Aziz (1982) observaram que à medida que o comprimento da partícula e a quantidade aumentou na composição, menor foi a trabalhabilidade obtida. Isto pode ser explicado pelo fato de que as partículas são hidrofílicas e, portanto, absorvem com facilidade a água disponível na mistura (SAVASTANO JR. *et al.*, 1999). Outros pesquisadores explicam, ainda, que os teores de partículas afetam o desempenho mecânico dos compósitos, principalmente a resistência à flexão (COUTTS; KIGHTLY, 1984; COUTTS; WARDEN, 1985). Altos teores de partículas na composição contribuem para a ocorrência de uma compactação ineficiente e na diminuição da densidade do compósito. Geralmente, o efeito benéfico das partículas é observado quando a proporção ótima destas é utilizada (HE *et al.*, 2019).

Stasiak *et al.* (2015) ao avaliarem as características mecânicas de serragem e lascas de madeiras com diferentes teores de umidade, observaram que os valores de módulo de elasticidade diminuem com o aumento do teor de umidade e que as lascas de madeira contribuíram para a diminuição da fluidez.

Com o intuito de melhorar as propriedades dos compósitos, alguns aditivos têm sido utilizados (SILVA *et al.*, 2006), dentre eles, os aditivos incorporadores de ar e superplastificantes. O primeiro contribui para a produção de materiais leves (ROMANO *et al.*, 2009), pois é capaz de introduzir pequenas bolhas de ar - ou vazios - dispersos pela matriz que contribuem para uma melhor coesão e a funcionalidade de compostos cimentícios impedindo a penetração da água e reduzindo a tendência de segregação e exsudação no estado fresco (MEHTA, MONTEIRO, 2014). O segundo consiste em compostos químicos capazes de permanecer adsorvidos na superfície das partículas de cimento, produzindo forças repulsivas que contribuem para a dispersão das partículas melhorando suas propriedades (UCHIKAWA *et al.*, 1995; WEATHERWAX *et al.*, 2010; OUATTARA *et al.*, 2018). A mais recente geração de superplastificantes (policarboxilato-éster – PCE) apresenta maior capacidade de dispersão quando comparados aos demais tipos de superplastificantes (AKHLAGHI *et al.*, 2017).

Ainda assim, é importante destacar que a madeira é resistente a diversos produtos químicos, o que lhe confere uma vantagem significativa com relação a outros materiais de construção, como o concreto e o aço, ou materiais alternativos. Isto porque, possui resistência a ácidos leves (com pH superior a 2,0), as soluções salinas ácidas e a agentes corrosivos. Por outro lado, se comparado à madeira, o aço apresenta maior durabilidade quando exposto à solução alcalina (BAJPAI, 2018). Em contato com a madeira, soluções alcalinas ou bases fortes tendem a atacar a hemicelulose e a lignina, permitindo que a celulose permaneça inteira em sua maior parte (MORRELL, 2018). Além disso, a alta alcalinidade pode causar a redução da resistência das fibras (HANNANT; SIVA; SREEKANTH, 2018).

Diversos estudos demonstraram, ainda, que o hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia, contribui para a degradação da fibra vegetal e, consequentemente, para a diminuição da durabilidade (ARDANUY *et al.*, 2011; TONOLI *et al.*, 2011).

2.2.2 Compósitos de madeira com gesso

Com a crescente conscientização e valorização dos fatores ambientais e de sustentabilidade, algumas características e propriedades do gesso – como a menor energia incorporada, a menor emissão de dióxido de carbono (CO₂) e a menor condutividade térmica – têm sido reconhecidas (DAI; FAN, 2015). Desta maneira, o gesso voltou a ser uma alternativa para substituição da cal e do cimento Portland em aplicações internas. Além disso, o processo produtivo do gesso ocorre a partir da calcinação realizada em temperaturas significativamente mais baixas – entre 135°C e 180°C – quando comparadas à cal e ao cimento. Por isso, o consumo de combustível tende a ser menor e, consequentemente, as emissões de CO₂ também (LUSHNIKOVA; DVORKIN, 2016).

Elementos produzidos com gesso apresentam rápido endurecimento e secagem, leveza, facilidade no manuseio, boa resistência ao fogo e boa absorção acústica. Entretanto, a principal desvantagem é a baixa resistência à água. Ainda assim, o gesso pode ser destinado a diversas aplicações, principalmente quando combinados com materiais porosos para a produção de elementos com propriedades melhoradas atuando como isolamento físico, térmico ou absorção acústica (BASPINAR; KAHRAMAN, 2011; VIMMROVÁ *et al.*, 2011; GENCEL *et al.*, 2014; GENCEL *et al.*, 2016; LUSHNIKOVA; DVORKIN, 2016).

O gesso é um dos primeiros materiais de construção utilizados pela humanidade, acredita-se que sua utilização teve início há, aproximadamente, 4000 anos atrás e, até hoje, os

produtos à base de gesso são considerados materiais ecologicamente corretos (RYAN, 1962). A extração e a produção do gesso estão amplamente distribuídas ao redor do mundo. Em 2014, foram produzidos aproximadamente 246 milhões de toneladas de gesso em 90 países e a China lidera a produção mundial de gesso (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2015). O principal componente do gesso é o sulfato de cálcio hemihidrato (CaSO₄.0,5H₂O) e sua produção ocorre a partir da extração da gipsita (CaSO₄. 2H₂O), seguida da britagem e moagem, para então ser calcinada e, por fim, classificada ou selecionada (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014).

Dependendo do tipo de calcinação empregada, podem ser produzidos duas formas diferentes de gesso, o gesso- α e gesso- β . Se a calcinação for realizada sob pressão de vapor de água, será produzido o gesso- α , que devido ao alto custo de produção é destinado para aplicações mais nobres. Enquanto o gesso- β por ser calcinado a seco sob pressão atmosférica, apresenta um processo produtivo mais simples e com baixo consumo de energia, por isso, pode ser utilizado para a produção de compósitos com madeira (SIMATUPANG; SCHMITT, 1994; MOSLEMI; BEGUM, 2001; HUANG; LIANG; HUNG, 2010; SHIBIAO *et al.*, 2013; BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014). O endurecimento de materiais produzidos com gesso ocorre de acordo com a reação exotérmica de hidratação conforme apresentado na equação (1).

$$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O + 1,5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \tag{1}$$

O consumo de água para o gesso utilizado na construção geralmente varia entre 50% a 70%, sendo que a relação água/gesso é considerada o fator que mais afeta as propriedades dos elementos produzidos com gesso.

Dependendo do tempo de pega, o gesso pode ser classificado como de pega rápida (com tempo de início de pega a partir de 2 min e fim a partir de 15 min), de pega normal (com tempo de início de pega a partir de 6 min e fim a partir de 30 min) e de pega lenta (com tempo de início de pega a partir de 20 min) (LUSHNIKOVA; DVORKIN, 2016). No Brasil, de acordo com a NBR 13207 (ABNT, 2017), o tempo de início de pega e de fim de pega do gesso para revestimento sem aditivo deve ser superior a 10 min e superior a 35 min, respectivamente.

Em compósitos produzidos com gesso e madeira, diferente do que ocorre em compósitos produzidos com cimento Portland, a presença de resíduos de celulose *kraft* alterou positivamente a cinética de hidratação de gesso. Isto porque, as fibras naturais são capazes de absorver e reter uma maior quantidade de água na matriz, permitindo a formação de cristais maiores ao seu redor e uma melhor aderência na matriz de gesso (CARVALHO *et al.*, 2008).

Os compósitos de gesso-madeira foram desenvolvidos somente a partir dos anos 80 (KOSSATZ; LEMPFER, 1982). Num primeiro momento, alguns pesquisadores acreditaram que os efeitos inibitórios provocados pelos extrativos da madeira no cimento poderiam alterar, também, a cinética de hidratação do gesso (SIMATUPANG; SCHMITT, 1994). Entretanto, atualmente, sabe-se que os principais extrativos da serragem – taninos e ácido acético – além da hemicelulose e da lignina, podem não prejudicar ou influenciar o desempenho mecânico das amostras produzidas com compósitos de gesso-serragem. Desta maneira, Dai e Fan (2015) sugerem que o baixo desempenho obtido pode estar relacionado à absorção de água pela serragem.

Ainda assim, painéis de gesso reforçados com fibras tendem a apresentar maior resistência quando comparadas às placas de *drywall* (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Diversos estudos desenvolveram compósitos de gesso contendo partículas lignocelulósicas como, por exemplo, painéis produzidos com gesso e fibra de bambu – que apresentaram boa absorção sonora (KANG *et al.*, 2012). Outros pesquisadores desenvolveram com sucesso compósitos contendo cimento, gesso, madeira e papel reciclado (DE ARAÚJO *et al.*, 2011). A produção de compósitos de gesso contendo fibras de tamareira indicou que o aumento da proporção de fibra na matriz de gesso contribuiu para a diminuição da condutividade térmica e para a diminuição da densidade no estado endurecido (CHIKHI *et al.*, 2013; CHIKHI, 2016).

Hernández-Olivares *et al.* (1999) avaliaram a compatibilidade de compósitos – contendo partículas de cortiça, gesso hemi-hidrato (CaSO₄.1/2H₂O) e água – e observaram que apesar da boa interação entre as partículas de cortiça e o gesso, as propriedades mecânicas foram baixas e, por isso, recomendam a incorporação de agentes de reforço, como fibras de vidro, para contribuir para o aumento das resistências à flexão e à compressão. A baixa densidade dos compósitos de gesso com cortiça apresenta viabilidade para a produção de placas de vedação vertical internas.

Recentemente, Morales-Conde, Rodríguez-Liñán e Pedreño-Rojas (2016) investigaram a influência das propriedades físicas e mecânicas de compósitos de gesso-madeira produzidos com lascas e serragem de madeira em diferentes proporções. Os resultados indicaram que quanto maior a proporção de madeira na composição, menor é a densidade endurecida e a condutividade térmica.

Pedreño-Rojas *et al.* (2017) utilizaram os resíduos de madeira provenientes de RCD – tanto em aparas como em serragem – para o desenvolvimento de placas de forro produzidas com compósitos de gesso com o objetivo de obter um compósito leve e com propriedades de isolamento térmico. Dentre os resultados obtidos, estes autores verificaram que a adição de partículas de madeira contribuiu para a diminuição da trabalhabilidade – quando comparada com a amostra de referência, isto porque, provocou a alteração da relação água/gesso –, quanto maior a proporção de madeira na composição menor é a densidade, menor é a dureza, menor é a condutividade térmica – sendo que as amostras contendo aparas apresentaram melhor comportamento térmico quando comparadas às amostras contendo serragem – e menor tende a ser o desempenho mecânico. É importante destacar que, ainda que a presença de partículas de madeira tenha contribuído para a diminuição do desempenho mecânico, ainda assim os compósitos atenderam os valores mínimos normatizados. Além disso, os pesquisadores avaliaram a influência da presença de palhas e de fibras de vidro nos compósitos, e concluíram que apenas as fibras de vidro contribuíram para o aumento da resistência nos compósitos produzidos com serragem.

No intuito de melhorar as propriedades dos compósitos, aditivos superplastificantes são capazes de proporcionar o aumento da fluidez e da resistência, além da capacidade de resistência à água da matriz de gesso (GARG *et al.*, 2016). Além disso, como a trabalhabilidade das pastas de gesso não é controlada com facilidade (TAN *et al.*, 2018) aditivos superplastificantes contribuem para sua plasticidade, proporcionando maior trabalhabilidade, assim como nos sistemas cimentícios (TAN *et al.*, 2014; LESAGE *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2017).

Pesquisadores relataram, ainda, que para a produção de painéis de GRG – *glass reinforced gypsum* – com a/g inferiores a 0,60, foi utilizado 3% (com relação à massa de gesso) de superplastificante à base de naftaleno sulfonado, devido à necessidade de se manter um nível mínimo de trabalhabilidade para a moldagem (OLIVEIRA; SELMO; AGOPYAN, 1997).

2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O estudo do empacotamento de partículas, explicado por Oliveira *et al.* (2000) *apud* De Castro e Pandolfelli (2009), consiste na seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais de tal maneira que os vazios maiores possam ser preenchidos por partículas menores e assim por diante. A densidade de empacotamento de partículas é considerada um fator importante que interfere no comportamento de materiais compósitos produzidos na indústria da construção civil, como em concretos, em asfaltos e em alumínios, por exemplo (REISI; MOSTOFINEJAD; RAMEZANIANPOUR, 2018).

2.3.1 Densidade de empacotamento de partículas nos materiais de construção

O concreto – considerado o material manufaturado mais consumido em todo o mundo – é composto por materiais cimentícios e agregados, sendo considerado um sistema granular. As propriedades e o comportamento dos materiais compósitos dependem das propriedades de seus constituintes principais (NEVILLE, 2011). Os agregados representam em torno de 60% a 80% do volume dos materiais utilizados para a produção de concretos (MOSTOFINEJAD; REISI, 2012).

Além disso, a classificação, a forma e a textura dos agregados têm efeitos significativos na plasticidade e na reologia dos concretos no estado fresco, e nas propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido (MOSTOFINEJAD; REISI, 2012). Por isso, a otimização dos agregados é uma opção atraente para contribuir para a melhoria das propriedades, diminuir o consumo dos materiais cimentícios, reduzir os custos com os materiais constituintes e minimizar os impactos ambientais associados à produção dos concretos (SOBOLEV; AMIRJANOV, 2010; MOINI *et al.*, 2015).

É importante destacar que, embora a pasta de cimento seja necessária para preencher os vazios de agregados, uni-los e proporcionar mobilidade no estado fresco, é também responsável pela retração por secagem, pela geração de calor, pela durabilidade e pela alta emissão de carbono (MEYER, 2009; MOSTOFINEJAD; REISI, 2012; WONG; CHAN; KWAN, 2013). Ou seja, se um volume maior de agregado puder ser empacotado num certo volume de concreto, por exemplo, menor será a quantidade de pasta necessária. Visto que, misturas contendo agregados com alta densidade de empacotamento exigem baixas quantidades de pasta para preencher os vazios entre os agregados (FIGURA 2.3-1) (WONG; KWAN, 2005; MOSTOFINEJAD; REISI, 2012; WONG; CHAN; KWAN, 2013; REISI; MOSTOFINEJAD; RAMEZANIANPOUR, 2018).



FIGURA 2.3-1 - REPRESENTAÇÃO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM CONCRETOS

FONTE: Adaptado de WONG e KWAN (2005).

Assim, a distribuição granulométrica dos agregados tem efeito significativo no desempenho dos materiais produzidos (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2017), podendo influenciar seu comportamento de duas diferentes maneiras (KWAN; NG; HUEN, 2014):

- Por ser capaz de influenciar a densidade de empacotamento do agregado que, por sua vez, determina o volume de vazios a serem preenchidos pela pasta. Com uma densidade de empacotamento maior, o volume de pasta necessário para preencher os vazios tende a ser menor e o volume de excesso de pasta que pode ser definida como a pasta em excesso com relação ao necessário para preencher os vazios no sistema, lubrificando as partículas disponível para envolver por uma película a superfície das partículas do agregado tende a ser maior.
- E, por ser capaz de afetar o tamanho médio das partículas e a superfície específica do agregado que, por sua vez, determina a área superficial das partículas a serem revestidas pela pasta. Com uma superfície específica maior, a espessura da película de pasta tende a ser menor, implicando numa menor trabalhabilidade e fluidez ou numa maior demanda de água.

O empacotamento de partículas otimizado tende a contribuir, ainda, para a diminuição da porosidade e da permeabilidade e, consequentemente, para o aumento da durabilidade dos

elementos construtivos (DE LARRARD; SEDRAN, 1994; LANGE; MORTEL; RUDERT, 1997; JUSTNES, 2009).

Os métodos e os modelos utilizados para determinar o empacotamento dos agregados têm sido discutidos por mais de um século (MOINI *et al.*, 2015), conforme apresentado a seguir.

2.3.2 Métodos e modelos utilizados para determinar a densidade de empacotamento de partículas

A densidade de empacotamento é expressa por um valor numérico que representa o volume de sólidos presentes em uma unidade de volume total (ELRAHMAN; HILLEMEIER, 2014; LI; KWAN, 2014; SBIA *et al.*, 2015). Em um sistema, o empacotamento das partículas é influenciado pela distribuição do tamanho e pela forma de cada partícula, pela distribuição granulométrica das partículas, pelo método de compactação aplicado e pela presença de líquidos, caso existam.

Considerando um volume total de partículas sólidas, o espaço intersticial entre as partículas pode ser descrito pelo índice de vazios. O índice de vazios ε é definido como a razão entre o volume de vazios e o volume aparente de partículas, enquanto a relação de vazios u é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume sólido de partículas. Na equação (2) está descrita a relação entre índice de vazios e taxa de vazios (WONG; KWAN, 2008).

$$\varepsilon = \frac{u}{1+u} \tag{2}$$

Por outro lado, a concentração de sólidos φ é definida como a razão entre o volume sólido das partículas e o volume ocupado pela massa das partículas. Na equação (3) está descrita a relação entre concentração de sólidos, índice de vazios e taxa de vazios (WONG; KWAN, 2008).

$$\varphi = 1 - \varepsilon = 1 - \frac{1}{1 + u} \tag{3}$$

Existem métodos experimentais e modelos de empacotamento de partículas que podem ser aplicados para selecionar as partículas no intuito de medir a densidade de empacotamento, no intuito de minimizar o volume de vazios para obter uma estrutura granular 2.3.2.1 Métodos experimentais de densidade de empacotamento

Os métodos experimentais foram desenvolvidos para determinar a densidade de empacotamento de partículas, sendo possível determinar a densidade de empacotamento diretamente a partir da densidade a seco (WONG; KWAN, 2008). Para partículas de agregados, por exemplo, é possível obter a densidade de empacotamento experimental a partir dos valores da massa específica e da massa unitária – de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009) para agregado miúdo e de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) para agregado graúdo – aplicando os resultados na equação (4).

$$\beta = 1 - \frac{ME - MU}{ME} \tag{4}$$

Em que β é a densidade de empacotamento; *ME* é a massa específica (g/cm³); *MU* é a massa unitária (g/cm³).

2.3.2.2 Modelos de empacotamento de partículas

Os modelos de empacotamento de partículas têm sido utilizados para definir a densidade de empacotamento ótima em um determinado conjunto granular. Genericamente, esses modelos dividem-se em três grupos principais (MOSTOFINEJAD; REISI, 2012):

- Utilizando testes de laboratório para desenvolver curvas otimizadas de classificação de tamanho do agregado (FULLER; THOMPSON, 1907 *apud* FENNIS, 2011);
- Desenvolvendo modelos numéricos, baseados em resultados experimentais, capazes de calcular analiticamente a densidade de empacotamento do conjunto (DE LARRARD, 1999);
- E, apenas para efeito de conhecimento pois estes modelos não serão utilizados no desenvolvimento deste estudo, a partir de simulações de computador que calculam a densidade de empacotamento máxima (SOBOLEV; AMIRJANOV, 2007; AMIRNAJOV; SOBOLEV, 2008; MOSTOFINEJAD; REISI, 2012).

2.3.2.2.1 Distribuição granulométrica ótima

A determinação de uma curva granulométrica ideal tem despertado o interesse de diversos pesquisadores desde o início do século XX (SOBOLEV; AMIRJANOV, 2010; ELRAHMAN; HILLEMEIER, 2014; KOUTNY *et al.*, 2016), entre eles Füller e Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930) e Funk e Dinger (1980). O primeiro modelo Füller e Thompson (1907) descrito por Fennis (2011) considera uma distribuição contínua de partículas, em que se supõe que as menores partículas são capazes de preencher os vazios existentes entre as partículas maiores, conforme apresentado na equação (5). Esses autores estabeleceram, ainda, um coeficiente de distribuição (q) igual a 0,50 para a obtenção de uma curva com a menor quantidade de vazios possível.

$$\frac{CPFT}{100} = \left(\frac{D}{D_{máx}}\right)^q \tag{5}$$

Em que *CPFT* é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a *D*; *D* é o diâmetro da partícula, igual à abertura da peneira (mm); $D_{máx}$ é o diâmetro máximo da partícula (mm); e q é o coeficiente de distribuição.

Numa tentativa de aperfeiçoar a curva proposta por Füller e Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930) substituíram o coeficiente q fixo por um coeficiente que variasse entre 0,33 e 0,50, estabelecido de modo experimental. Entretanto, mesmo com a adaptação realizada por Andreasen e Andersen (1930), Funk e Dinger (1980) – conforme explicado por Fennis (2011) – observaram que a equação (5) não considera um limite mínimo com relação às dimensões das partículas, admitindo-se partículas infinitamente pequenas, o que não representa a situação real. Por isso, esses pesquisadores propuseram um limite inferior ao conjunto de partículas conforme apresentado na equação (6).

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{D^q - D^q_{min}}{D^q_{max} - D^q_{min}}$$
(6)

Em que *CPFT* é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a *D*; *D* é o diâmetro da partícula, igual à abertura da peneira (mm); $D_{máx}$ é o diâmetro da maior partícula (mm); $D_{mín}$ é o diâmetro da menor partícula (mm); e q é o coeficiente de distribuição.

A equação (6) proposta por Funk e Dinger (1980) também é conhecida como modelo de Alfred ou modelo de Andreasen modificado.

É importante destacar que esses modelos consideram apenas o diâmetro das partículas, ignorando sua forma, na determinação da curva granulométrica ideal (LONDERO *et al.*, 2017).

2.3.2.2.2 Modelos analíticos

O segundo grupo consiste em modelos analíticos de empacotamento que calculam a densidade de um conjunto de partículas (MOSTOFINEJAD; REISI, 2012; KOUTNY *et al.*, 2016). Esses são baseados em equações matemáticas que prescrevem como as partículas de diferentes tamanhos interagem geometricamente. Esses modelos baseiam-se em dois dados de entrada: a distribuição granulométrica das partículas e a densidade de empacotamento de grãos de diversos tamanhos, chamados de classes. Diversos métodos foram desenvolvidos, mas foi De Larrard (1999) quem propôs um método consagrado, por considerar a interpolação com a densidade real, levando em conta o tipo de compactação da mistura. Este método (DE LARRARD, 1999) é conhecido como modelo de empacotamento compressível (*Compressible Packing Model – CPM*) e tem como objetivo prever a densidade de empacotamento polidispersa da mistura a partir de três parâmetros: o tamanho dos grãos de cada classe (descrito nas curvas granulométricas); a forma dos grãos; e o método de execução do empacotamento. O método (DE LARRARD, 1999) consiste em obter o menor valor para a densidade de empacotamento virtual γ_i , conforme apresentado na equação (7), para que então seja obtida a densidade de empacotamento efetiva Φ .

Υi

$$= \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \times \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right] \times y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \times \frac{\beta_i}{\beta_j}\right] \times y_j}$$
(7)

Em que β_i e β_j são as densidades de empacotamento para cada classe; e y_j é o volume de material de cada classe.

O cálculo do modelo (DE LARRARD, 1999) depende da determinação dos valores do efeito de afastamento a_{ij} e o efeito parede b_{ij} , conforme apresentado nas equações (8) e (9). Esses efeitos consistem na interação dos grãos. O primeiro ocorre quando as partículas mais finas são grandes demais para se encaixarem nos vazios entre as partículas maiores, ocorre um

afastamento dos grãos maiores, também provocando o aumento da porosidade e, consequentemente, a diminuição do empacotamento. Já o efeito parede, ocorre quando for inserida uma partícula maior nas partículas menores dominantes. A parede do agregado graúdo impedirá que os agregados miúdos se aproximem nesta área, dessa forma reduzindo a quantidade em um determinado volume.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - \frac{d_j}{d_i})^{1,02}} \tag{8}$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - \frac{d_i}{d_j})^{1,50} \tag{9}$$

Em que d_i é o diâmetro das partículas da classe dominante chamada *i* e d_j é o diâmetro das partículas das demais classes chamadas *j*.

Por fim, ao considerar a característica do processo de compactação do empacotamento K' (TABELA 2.3-1) é possível obter a densidade de empacotamento efetiva Φ , conforme apresentado na equação (10).

$$K' = \sum_{i=1}^{n} \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\Phi} + \frac{1}{\gamma_i}}$$
(10)

Processo de compactação	Valor de K
Lançamento simples	4,10
Apiloamento	4,50
Vibração	4,75
Demanda de água	6,70
Vibração e compressão de 10kPa	9,00

TABELA 2.3-1 – VALORES ATRIBUÍDOS AO ÍNDICE K

Pesquisadores explicam que, para aplicações mais gerais do estudo do empacotamento de partículas – como, por exemplo, em partículas não esféricas – é necessário um maior desenvolvimento dos modelos de empacotamento para permitir os efeitos da forma de partículas (KWAN; WONG; FUNG, 2015; HETTIARACHCHI; MAMPEARACHCHI, 2018).

Utilizando método de elementos finitos discretos, pesquisadores (SEELEN *et al.*, 2018) introduziram um novo método para simular composições contendo partículas de forma

FONTE: DE LARRARD (1999).

convexa. O método de elementos finitos discretos foi utilizado para gerar o empacotamento de partículas aleatórias num recipiente cilíndrico. As formas simuladas incluíram partículas não esféricas com diferentes proporções de aspecto cubóides, cilindros e elipsoides, além de formas poliédricas representando partículas de areia e lascas de madeira (com forma e tamanho únicos, se assemelhando às partículas granulares reais).

Dentre as simulações realizadas para as partículas não esféricas alongadas, observouse que a densidade de empacotamento obtido para os modelos esféricos e elipsoidal em forma de areia foram de 0,546 e 0,550, respectivamente. Diferente destes, a densidade de empacotamento obtida para as aparas de madeira foi de 0,382, isto porque, estas partículas apresentaram o menor volume sólido dentre as partículas simuladas (SEELEN *et al.*, 2018).

Apesar dos estudos recentes que têm sido desenvolvidos, ainda não existe um método aceito para determinar a densidade de empacotamento de materiais a base de cimento reforçado com fibras flexíveis (KWAN; WONG; FUNG, 2015).

É importante destacar que, no presente trabalho, as partículas de madeira – mesmo que consideradas como agregados – são lamelares, não inertes e absorvem água.

2.4 PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS

Historicamente, na América do Sul, materiais de construção convencionais – como o bloco cerâmico – foram intensamente utilizados na indústria de construção de moradias. Pesquisadores acreditam que questões geológicas e culturais – como o fato da imigração dos habitantes do sul da Europa que possuíam grandes depósitos de argila próximos aos centros urbanos – tenham contribuído para a preferência histórica pelo bloco cerâmico (BIANUCCI, 2009). Recentemente, a taxa de crescimento dos grandes centros urbanos impulsionou a exploração de materiais de construção alternativos sustentáveis produzidos com recursos renováveis (AINSTEIN, 2012).

Placas de gesso acartonado, placas OSB, placas cimentícias ou aglomerados de cimento e madeira são utilizados em diversas partes do mundo como acabamento de paredes e tetos internos, como isolamentos térmico e acústico, ou então, de acordo com suas especificidades, em funções estruturais em paredes e telhas externas. Um dos principais atrativos para a utilização destes materiais em substituição de outros é a necessidade de utilização e, consequentemente, do desenvolvimento de materiais leves para aplicação em construções *off site* – com adaptabilidade a formas incomuns e com propriedades de isolamento

térmico e acústico – e em sistemas construtivos como o *steel frame* e o *wood frame* – que tendem a contribuir para a industrialização da construção, incluindo a racionalização, a padronização, a modularização e a transformação do local de trabalho em uma linha de montagem (ASIZ *et al.*, 2011; TITTELEIN; CLOUTIER; BISSONNETTE, 2012; GOMES; DE SOUZA; TRIBESS, 2013; MATOSKI; RIBEIRO, 2016; MALESZA; MIEDZIALOWSKI, 2017; LACEY *et al.*, 2018).

2.4.1 Métodos modernos de construção

Tradicionalmente, a construção *in loco* ou convencional consiste em construir um empreendimento num canteiro de obras, após a fase de projeto e a partir da contratação de uma empresa ou empreiteiro. Entretanto, nas últimas décadas, a construção civil foi exposta ao processo de industrialização que impulsionou o desenvolvimento de diferentes métodos construtivos. Como resultado, a construção *off site* tornou-se uma opção diante da construção *in loco*. Esta técnica tem sido amplamente utilizada em países de todo o mundo, principalmente na América do Norte, no Japão e na Europa (QUALE *et al.*, 2012; KAMALI; HEWAGE, 2016; FERDOUS *et al.*, 2019).

A construção *off site* é caracterizada pelo processo de fabricação ou de pré-montagem de elementos, componentes ou módulos de construção antes de realizar sua instalação no local final (GIBB, 2001).

Pesquisadores acreditam que as construções pré-fabricadas (FIGURA 2.4-1a) e modulares (FIGURA 2.4-1b) são uma tendência para as habitações nas próximas gerações e destacam que os materiais compósitos são uma alternativa para os materiais de construção tradicionais que são aplicados nestes sistemas (FERDOUS *et al.*, 2019). Outros explicam que à medida que o nível de pré-fabricação dos elementos aumenta, a utilização de materiais, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) tendem a diminuir (PONS; WADEL, 2011, HONG *et al.*, 2016) – desde que sejam minimizados também os impactos relativos ao transporte (MAO *et al.*, 2013).



FIGURA 2.4-1 – PAREDE PRÉ-FABRICADA [a] E MÓDULO DE UM EMPREENDIMENTO EM

FONTE: VELJKOVIC; JOHANSSON (2006) e LAWSON; RICHARDS (2010).

Estudos destacam que a utilização de métodos construtivos *off site* são capazes de contribuir para uma construção sustentável, com menores impactos ambientais e diminuição do volume de resíduos gerados quando comparados com os métodos construtivos convencionais (LI; SHEN; ALSHAWI, 2014; ZHANG; SKITMORE; PENG, 2014; ARASHPOUR *et al.*, 2016; KAMALI; HEWAGE, 2016). Diversos pesquisadores avaliaram o impacto da redução dos resíduos de construção produzidos a partir de construções *off site* e observaram que o desperdício pode ser reduzido em média a 52% quando comparados com construções convencionais (JAILLON; POON; CHIANG, 2009).

É importante destacar que esses sistemas são capazes de combinar diferentes materiais, elementos estruturais e detalhes construtivos, além de técnicas construtivas que atendem aos critérios de desempenho, contribuindo para um ambiente construído mais sustentável (NEWCOMBE *et al.*, 2008; WANNINGER; FRANGI, 2014). A combinação de materiais nestes sistemas surge como uma maneira de minimizar a utilização de recursos, contribuindo para a diminuição do impacto ambiental do setor construtivo e fornecendo um desempenho – geralmente – superior quando comparados ao de seus componentes individualmente (CECCOTTI, 2002).

2.4.2 Utilização e avaliação das propriedades e do desempenho mecânico, acústico e térmico

Placas de gesso têm sido utilizadas em grande escala para a construção de edifícios – principalmente como vedação vertical e forro horizontal interno (TITTELEIN; CLOUTIER; BISSONNETTE, 2012) – devido à sua disponibilidade, ao seu baixo custo, à sua facilidade de produção, à sua estabilidade dimensional e à sua resistência ao fogo (MARTIAS; JOLIFF; FAVOTTO, 2014; LUSHNIKOVA; DVORKIN, 2016). O *drywall* é considerado o tipo de placa de gesso mais comum e é produzido a partir da colagem da placa de gesso sobre papel cartão podendo ser resistente à água e resistente ao fogo (LUSHNIKOVA; DVORKIN, 2016).

Já os painéis produzidos com madeira, apesar de amplamente utilizados, são confeccionados a partir da união da madeira com água, cola ou resina na presença de calor ou pressão. Dentre os materiais mais comuns, é possível destacar os painéis de compensado, os painéis aglomerados e os painéis de fibras (CURLING; KERS, 2017).

Apesar do processo produtivo desses painéis serem tradicionalmente realizado sob temperatura ou pressão, Tittelein, Cloutier e Bissonnette (2012) produziram placas de vedação vertical a partir de uma mistura úmida – contendo resíduos de madeira, cimento, água, aditivos químicos (acelerador de pega e superplastificante) – lançada em moldes.

O desempenho exigido através de normas cada vez mais restritivas demonstra a necessidade de serem desenvolvidos novos materiais capazes de atender às especificações (XIAO; MA, 2012; MOURITZ *et al.*, 2013; KANDARE; LUANGTRIRATANA; KANDOLA, 2014; JEENCHAM; SUPPAKARN; JARUKUMJORN, 2014). Espera-se que os materiais satisfaçam demandas estruturais, térmicas e acústicas – incluindo absorção sonora e isolamento acústico (MATOSKI; RIBEIRO, 2016). Entretanto, tem sido muito difícil obter um material capaz de apresentar, simultaneamente, boa resistência e bom isolamento acústico (BAKATOVICH; DAVYDENKO; GASPAR, 2018).

Neste sentido, os compósitos híbridos surgem como uma alternativa para o desenvolvimento de novos produtos consiste em compósitos produzidos com dois ou mais tipos de reforços (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2019). Esses passaram a ter maior utilização devido às melhorias de suas propriedades mecânicas, estabilidade térmica e durabilidade (VENKATESHWARAN; ELAYAPERUMAL; SATHIYA, 2012; YANG *et al.*, 2012).

Diferentes tipos de reforços naturais têm sido utilizados em compósito, tais como celulose, madeira, algodão, juta, bagaço de cana, entre outros. Apesar destas fibras afetarem negativamente o desempenho mecânico dos compósitos, diferentes pesquisadores têm demonstrado que existe viabilidade em utilizar fibras naturais em compósitos minerais (PEDREÑO-ROJAS *et al.*, 2017), conforme explicado no Capítulo 2.2. Ainda assim, elementos produzidos com compósitos contendo fibras vegetais são indicados para aplicações não estruturais (WEI; TOMITA, 2001; ROMA JR.; MARTELLO; SAVASTANO JR., 2008).

Morales-Conde, Rodríguez-Liñán e Pedreño-Rojas (2016) verificaram que compósitos de gesso-madeira produzidos com serragem ou aparas de madeira nos teores de 5% e 2,5%, respectivamente, apresentaram diminuição na resistência à flexão e à compressão quando comparadas às amostras de referência. Apesar disso, os compósitos atenderam aos requisitos de norma, neste caso a EN 13279-1, atingindo resistência à flexão superior a 1 MPa e à compressão superior a 2MPa. Ao avaliar o comportamento ao impacto destes painéis, os autores observaram que a penetração e os vestígios de danos na superfície do painel foram insignificantes, permitindo que tanto a manutenção como os requisitos de segurança contra impactos fossem atendidos.

Pedreño-Rojas *et al.* (2017) desenvolveram placas de forro produzidas com compósitos contendo resíduos de gesso e de madeira de RCD – sendo como serragem ou como aparas. Para avaliar o desempenho mecânico, este novo material foi submetido ao ensaio de resistência à flexão (FIGURA 2.4-2a) permitindo verificar que apesar das placas produzidas com os compósitos apresentarem desempenho inferior às amostras de referência, estas atingem os valores mínimos estipulados por norma.

Da mesma maneira, Ferreira *et al.* (2016) avaliaram a viabilidade de utilização de um painel sanduíche de vedação vertical produzido com cortiça e, para isso, realizaram ensaios mecânicos de resistência à compressão, de resistência à compressão de borda, de resistência à flexão e de impacto (FIGURA 2.4-2b e FIGURA 2.4-2c).

FIGURA 2.4-2 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM PLACAS DE FORRO [a], ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BORDA [b] E ENSAIO DE IMPACTO EM PLACAS DE VEDAÇÃO



FONTE: PEDREÑO-ROJAS et al. (2017) e FERREIRA et al. (2016).

Dentre os diferentes parâmetros pelos quais as placas e os painéis têm sido avaliados, o desempenho acústico apresenta grande importância. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), nos últimos anos, os efeitos da poluição sonora sobre a saúde vêm se acumulando (WHO, 2011). As pessoas estão expostas diariamente ao barulho dentro de suas próprias casas (JEON; RYU; LEE, 2010) e a exposição a altos níveis de ruído constitui um risco para a saúde e o bem-estar (WHO, 2011; PENG, 2017), além de estar relacionada a uma série de emoções negativas (FIELDS, 1998; MICHAUD; KEITH; MC MURCHY, 2005) e doenças cardiovasculares (BABISCH, 2008). Muitos são os ruídos existentes nas edificações, tais como sons transmitidos pelo ar, ruídos de tráfegos, entre outros. Uma maneira de minimizar a influência da poluição sonora é utilizando isolamento acústico ou técnicas construtivas com níveis de desempenho adequados à finalidade de cada ambiente (REIXACH *et al.*, 2015; MATOSKI; RIBEIRO, 2016).

Atualmente, barreiras acústicas e materiais com capacidade de absorção sonora têm sido utilizados para atenuar a energia acústica, contribuindo para controlar o ruído nos espaços internos (PENG, 2017; WANG *et al.*, 2022). Isto porque, quando as ondas sonoras encontram a superfície do material: parte delas reflete, parte deles permeia e o restante é absorvido pelo próprio material (ZHANG, 2011). Desta maneira, a absorção sonora é uma solução muito conhecida e comumente usada para reduzir o ruído, além de explorar as características de alguns materiais capazes de dissipar a energia acústica (VIGÉ, 2010).

A absorção sonora pode ser definida como a medida da quantidade de energia removida da onda sonora quando a onda passa através de uma dada espessura de material (SHRIVASTAVA, 2018). O parâmetro que melhor descreve a absorção sonora dos materiais é o coeficiente de absorção que é definida como a proporção da energia sonora absorvida por uma superfície com relação à energia sonora incidente nessa superfície, assumindo valores entre 0 e 1 (ANTÓNIO, 2011; CHANLERT *et al.*, 2022).

Os materiais fibrosos são excelentes absorvedores de som e, quando usados em conjunto com outros materiais, eles podem aumentar o som no ar e impactar isolamento (ANTÓNIO, 2011). Em geral, madeiras com densidade menor obtém melhor desempenho de absorção. Por outro lado, considerando madeiras de mesma densidade, a propriedade de absorção tende a ser superior para as folhosas quando comparadas com as coníferas (PENG, 2017). A absorção sonora de materiais fibrosos pode ser medida de duas maneiras: em uma câmara de reverberação ou em um tubo de impedância (ANTÓNIO, 2011).

Outra propriedade relevante para o conforto acústico é a capacidade de isolamento acústico de materiais ou elementos de construção que é representada pelo índice de redução de

som chamado, também, de perda de transmissão sonora (*sound transmission loss* - STL) e expresso em decibéis (PENG, 2017; CHANLERT *et al.*, 2022).

É importante destacar que o ruído pode ser reduzido de duas maneiras diferentes: isolamento e absorção sonora. O equilíbrio entre eles é muito importante. Uma solução baseada em forte isolamento com baixa absorção provavelmente não é otimizada em termos de peso e custo. Uma solução ideal requer um equilíbrio entre as duas soluções. Além disso, um nível muito alto de absorção sonora pode resultar numa situação inadequada. A falta de reflexões das ondas sonoras da fala, por exemplo, dificultaria a compreensão das palavras. Portanto, um bom equilíbrio deve levar em consideração tanto as características relacionadas ao custo e ao peso quanto à qualidade do som (VIGÉ, 2010).

Estudos recentes demonstram a importância da porosidade em materiais desenvolvidos para atuar no comportamento acústico, tais como a distribuição e a dimensão dos poros e o desempenho – como as propriedades de absorção, de atenuação acústica e de amortecimento de vibrações (TIUC *et al.*, 2019).

Seguindo essa tendência, Del Rio Merino, Santa Cruz e Hernández Olivares (OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS, 1999) desenvolveram e patentearam placas de gesso produzidas com cortiça capazes de contribuir para a melhoria do isolamento acústico e térmico dos ambientes. Outros pesquisadores (RICCIARDI; BELLONI; COTANA, 2014) desenvolveram painéis acústicos contendo materiais recicláveis, enquanto Wang *et al.* (2016) desenvolveram painéis de aglomerados de cimento com isolamento acústico e térmico contendo resíduos de madeira de RCD.

Hernández-Olivares *et al.* (1999) desenvolveram um compósito de cortiça com gesso e observaram que, apesar da semelhança com as placas de gesso utilizadas para vedação vertical, este novo material não possuía a capacidade de absorver o som, mas sim de refleti-lo. Por isso, ainda seria necessário utilizar um material capaz de absorver sons e ruídos.

Enquanto, He *et al.* (2019) verificaram que para as placas produzidas com cimento de oxicloreto de magnésio com resíduos de madeira, os resultados apresentaram melhor isolamento acústico para frequências acima de 1600 Hz. Além disso, quanto maior o teor de fibra de madeira utilizada para a produção da placa, melhores foram as propriedades de isolamento acústico obtidas.

Por fim, considerando as propriedades relacionadas ao isolamento térmico (FIGURA 2.4-3), Palumbo *et al.* (2016) avaliaram o comportamento higrotérmico de seis materiais de isolamento biológico diferentes – sendo o linho de cânhamo, fibra de cânhamo, lã de madeira,

fibra de madeira, amido de palha e alginato de milho – e concluíram que a escolha do tipo de fibra natural adotada pode ter implicações no desempenho do elemento construtivo.

FIGURA 2.4-3 – TESTE TÉRMICO NÃO PADRONIZADO REALIZADO PARA ESTUDAR O COMPORTAMENTO TÉRMICO DA PLACA DESENVOLVIDA [a] E IMAGEM TÉRMICA DAS AMOSTRAS AVALIADAS E AS DISTRIBUIÇÕES DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE [b]



FONTE: PEDREÑO-ROJAS et al. (2017); RICCIARDI; BELLONI; COTANA (2014).

De modo geral, as propriedades térmicas dos compósitos de gesso que têm sido desenvolvidos contendo fibras vegetais são superiores aos compósitos de referência. Pesquisadores (MORALES-CONDE; RODRÍGUEZ-LIÑÁN; PEDREÑO-ROJAS, 2016) indicam que quanto maior a porcentagem de madeira, menor é a condutividade térmica, proporcionando ao material melhor desempenho térmico. Estes destacam, ainda, que tende a ocorrer maior diminuição da condutividade térmica nos compósitos produzidos com aparas de madeira quando comparados com os compósitos contendo serragem.

Estudos realizados com a incorporação de cortiça em compósitos de gesso, no intuito de verificar o comportamento das propriedades térmicas em placas de forro, demonstraram que devido à sua microestrutura e porosidade, os compostos dosados com cortiça, apresentaram uma redução de, aproximadamente, 30% da condutividade térmica quando comparado com os compósitos de gesso sem cortiça (CHERKI *et al.*, 2014).

Além disso, de acordo com o estudo desenvolvido por Ferreira *et al.* (2016), os aglomerados contendo cortiça que apresentaram menor densidade também indicaram possuir as melhores propriedades térmicas. Isto se torna importante especialmente para empreendimentos que aliam estruturas mecanicamente eficientes com baixo peso.

De acordo com a literatura, atualmente, não existe nenhum material capaz de atender todos os requisitos relacionados às propriedades e ao desempenho e, ainda, ao impacto ao meio ambiente e à saúde humana (JELLE, 2011).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver placas de vedação vertical interna produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira e, para isso, após a caracterização dos materiais utilizados, foram realizados quatro estudos.

O primeiro estudo avaliou a influência da composição granulométrica das partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira. Para isso, foram produzidos compósitos e realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

O segundo estudo avaliou a influência do aditivo superplastificante em compósitos com partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira. Para isso, foram produzidos compósitos e realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

O terceiro estudo avaliou o empacotamento das partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD), no intuito de compreender o comportamento destas partículas para a redução do consumo de aglomerante na produção de compósitos de madeira. Para isso, foram comparadas as curvas granulométricas das partículas de madeira com modelos da literatura e, na sequência, foram obtidas as proporções dos materiais necessários para produzir um compósito com maior densidade de empacotamento.

Por fim, o quarto estudo verificou o desempenho das placas de vedação verticais internas produzidas com os compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira desenvolvidos. Foi realizada a avaliação das propriedades físicas e mecânicas de acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021) e das propriedades químicas; e, a avaliação do desempenho – quanto à verificação da resistência a impactos de corpo duro (de acordo com a NBR 15575-4 Anexo B (ABNT, 2021) e NBR 11675 (ABNT, 2016)), à verificação da resistência a impactos de corpo mole (de acordo com a NBR 11675 (ABNT, 2016)), à solicitações de peças suspensas (de acordo com a NBR 15575-4 Anexo A (ABNT, 2021)), à dureza superficial (de acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021)) – na avaliação do desempenho acústico de acordo com a ISO 10140-2 (ISO, 2021), e na avaliação experimental do desempenho térmico.

Tanto os procedimentos como os estudos desenvolvidos (FIGURA 3-1), bem como as proporções dos materiais e os ensaios realizados para a produção e avaliação dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira estão apresentados no decorrer deste capítulo.


3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste estudo foram caracterizados (FIGURA 3.1-1) em laboratório de acordo com a normatização vigente ou a partir das informações fornecidas por seus respectivos fabricantes. Foram utilizados aglomerantes minerais, aditivos químicos, resíduos de madeira e água.





3.1.1. Aglomerantes

Foram utilizados como aglomerantes o cimento Portland e o gesso.

3.1.1.1. **Cimento Portland**

O cimento Portland utilizado foi o CPV ARI-RS (Alta Resistência Inicial Resistente à Sulfato) de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Na TABELA 3.1-1, está apresentada a composição química obtida a partir do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). A composição química semi-quantitativa foi obtida através do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná. Utilizou-se o espectrômetro de fluorescência de raios X – Panalytical – modelo Axios Max.

CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O 3 (%)	MgO (%)	SO3 (%)	Fe ₂ O 3 (%)	K2O (%)	TiO ₂ (%)	Na2 O (%)	P2O5 (%)	SrO (%)	Mn O (%)	ZnO (%)	Cl (%)	P. F. (%)
54,70	20,90	6,00	4,20	3,90	3,40	1,10	0,40	0,30	0,20	0,10	0,10	0,10	<0,1 0	4,98
FONTE: LAMIR (2019).														

TABELA 3.1-1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CPV ARI

Nas TABELA 3.1-2 e TABELA 3.1-3, estão apresentadas a caracterização física e mecânica do cimento Portland CPV ARI-RS conforme os dados médios comerciais informados pelo fabricante, respectivamente.

TABELA 3.1-2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO CPV ARI

Finura	Finura	Plaina	Massa	Água de	Tempo d	Evnansihilidada	
#200 (%)	#325 (%)	(cm ² /g)	específica (g/cm³)	consistência (%)	Início (min)	Fim (min)	a quente (mm)
0,0	0,6	5110	3,00	29,8	211	270	0,5
						-	

FONTE: O fabricante (2018).

TABELA 3.1-3 – CARACTERIZAÇÂ	ÃO MECÂNICA DO CIMENTO CPV ARI	

Resistência à compressão (MPa)								
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias					
21,5	31,7	37,9	48,1					
FONTE: O fabricante (2018).								

Foi realizada, ainda, a composição granulométrica a laser do cimento Portland CPV ARI-RS (FIGURA 3.1-2). A determinação da composição granulométrica por difração de raios laser também foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná. Utilizou-se o Granulômetro MICROTRAC S3500.



FIGURA 3.1-2 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER DO CIMENTO CPV ARI-RS

3.1.1.2. Gesso

O gesso de pega lenta utilizado foi caracterizado quanto à composição química obtida a partir do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) (TABELA 3.1-4) de acordo com a NBR 13207 (ABNT, 2017). A composição química semi-quantitativa foi obtida através do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná. Utilizou-se o espectrômetro de fluorescência de raios X – Panalytical - modelo Axios Max.

SO3 (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	SrO (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	P. F. (%)		
49,60	42,40	0,30	0,20	0,20	0,10	0,10	7,19		
	FONTE: LAMIR (2019).								

TABELA 3.1-4 – COMPOSIÇÃO OUÍMICA DO GESSO

De acordo com a composição química do gesso, dentre os parâmetros avaliados pela NBR 13207 (ABNT, 2017), o óxido de cálcio (CaO) encontra-se dentro do valor estipulado (\geq 38,0%), enquanto o anidrido sulfúrico (SO₃) encontra-se inferior ao valor estipulado por norma (\geq 53%).

Foi realizada, ainda, a composição granulométrica a laser do gesso (FIGURA 3.1-3). A determinação da composição granulométrica por difração de raios laser também foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná. Utilizou-se o Granulômetro MICROTRAC S3500.



FIGURA 3.1-3 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER DO GESSO

Nas FIGURA 3.1-4 e TABELA 3.1-5, estão apresentadas a caracterização física a partir da massa unitária de acordo com a NBR 12127 (ABNT, 2017). A caracterização física indica que os parâmetros avaliados se encontram dentro dos limites estipulados. Os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (LAME/DCC UFPR).

FIGURA 3.1-4 – PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA DO GESSO



FONTE: A autora (2023).

TAB<u>ELA 3.1-5 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO G</u>ESSO Massa unitária (kg/m³) 842,01 FONTE: A autora (2023).

3.1.2. Aditivos químicos

Foram utilizados os seguintes aditivos químicos: acelerador de pega e superplastificante.

O aditivo acelerador de pega utilizado foi à base de silicato de sódio e suas características estão apresentadas na TABELA 3.1-6.

Característi	Características do aditivo acelerador de pega								
Estado Físico	Líquido								
Forma	Líquido								
Cor	Incolor								
Odor	Inodor								
Composição básica	Silicatos								
Principal composto químico pH	Silicato de sódio (concentração de 28% a 32%) $11,0 \pm 2,0$								
Solubilidade	Solúvel em água								
Dosagem (%)	3,00 a 15,00 (sobre a massa do cimento)								
Densidade (g/mL)	1,27								

TABELA 3.1-6 – CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO ACELERADOR DE PEGA

FONTE: O fabricante (2018).

Neste estudo, após a realização de ensaios preliminares, o teor de aditivo acelerador de pega utilizado para a produção de todos os compósitos de cimento-madeira foi fixado em 5% com relação à massa do cimento (ROCHA *et al.*, 2016).

As características do aditivo superplastificante utilizado estão apresentadas na TABELA 3.1-7.

Para determinar o teor de aditivo superplastificante a ser utilizado em cada composição, geralmente é realizado a avaliação do teor de saturação do aditivo. Entretanto, neste estudo foi adotado o limite indicado pelo fabricante pois considerou-se que parte do aditivo pode ser absorvido pelas partículas de madeira. O teor máximo indicado pelo fabricante foi de 1% com relação à massa do aglomerante.

Características do aditivo superplastificante							
Estado Físico	Líquido						
Forma	Líquido						
Cor	Incolor						
Odor	Característico						
Composição básica	Policarboxilatos						
Principal composto químico pH	Policarboxílico (concentração de 30%) 4,0 a 6,0						
Solubilidade	Solúvel em água						
Dosagem (%)	0,30 a 1,00 (sobre a massa do aglomerante)						
Densidade (g/mL)	1,06						

TABELA 3.1-7 – CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

FONTE: O fabricante (2020).

3.1.3. Partículas de madeiras recicladas

3.1.3.1. Obtenção dos reciclados

A madeira utilizada neste trabalho é caracterizada como resíduo de construção e demolição (RCD), pois foi obtida a partir de sobras de insumos de construções residenciais da Região de Curitiba – PR e de Rio Negrinho – SC, sendo de compensado, eucalipto e pínus.

Os resíduos de madeira foram separados, coletados, limpos e, no caso do eucalipto, descascados. A moagem foi realizada num moinho de martelos (FIGURA 3.1-5) com potência de 5,0 cv e 1160 RPM. Nas FIGURA 3.1-6, FIGURA 3.1-7 e FIGURA 3.1-8 é possível observar os procedimentos de coleta, preparo e moagem de cada tipo de resíduo.

FIGURA 3.1-5 – MOINHO DE MARTELOS UTILIZADO PARA A MOAGEM DOS RESÍDUOS DE MADEIRA



FONTE: ROCHA (2017).



FONTE: ROCHA (2017).

FIGURA 3.1-7 – MOAGEM DO RESÍDUO DE EUCALIPTUS SPP



FONTE: ROCHA (2017).

FIGURA 3.1-8 – MOAGEM DO RESÍDUO DE PÍNUS SPP





FONTE: ROCHA (2017).

Quanto ao procedimento de moagem, este foi realizado da mesma maneira para os três diferentes tipos de madeira. Neste processo, o tempo que o resíduo levou para percorrer o moinho de martelos e originar as partículas recicladas foi de, aproximadamente, 3 segundos. Entretanto, foram produzidas partículas recicladas de três diferentes maneiras para cada tipo de madeira.

As composições granulométricas (CG) identificadas como CG01 foram submetidas a apenas uma repetição do procedimento de moagem, enquanto as composições CG03 foram moídas por três vezes consecutivas e, por fim, as composições granulométricas identificadas como CGP1,2 referem-se às partículas submetidas a apenas uma repetição do procedimento de moagem e obtidas a partir do passante na peneira 1,2 mm (TABELA 3.1-8).

TABELA 3.1-8 – IDENTIFICAÇÃO DAS DIFERENTES COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA

Identificação	Características				
CG01	Partículas geradas após a moagem realizada uma vez (1x) no moinho				
CG03	Partículas geradas após a moagem realizada três vezes (3x) no moinho				
CGP1,2	Partículas geradas a partir do passante na peneira 1,2 mm				
FONTE: A autora (2023).					

Após a moagem dos resíduos de madeira, as partículas foram armazenadas em sacos de ráfia, e acondicionadas em local coberto e protegido.

É importante destacar que apenas nos itens 3.2 e 4.1 deste estudo foram realizadas análises comparativas entre as três diferentes composições granulométricas. Nos demais itens, sempre que houver menção à composição granulométrica das partículas de madeira, a autora está se referindo à CG01.

3.1.3.2. Caracterização das partículas de madeira reciclada

As partículas de madeira recicladas foram caracterizadas (FIGURA 3.1-9) quanto à composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2001) e quanto à massa unitária de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).



FIGURA 3.1-9 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Procedimento para a determinação da massa unitária; [b] Procedimento para a determinação da composição granulométrica.

Nas FIGURA 3.1-10 e FIGURA 3.1-11 estão apresentadas a distribuição granulométrica e a massa unitária das partículas de madeira recicladas, respectivamente.



FONTE: A autora (2023).



Foram realizadas, ainda, a determinação da densidade básica (método de imersão) e a densidade aparente de cavacos de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003) e a NBR 14984 (ABNT, 2003), respectivamente; a determinação do teor de umidade de cavacos (método por secagem em estufa) de acordo com a NBR 14929 (ABNT, 2017), e a determinação do D₅₀ que corresponde ao diâmetro através do qual passam 50% das partículas. Os ensaios de caracterização física das partículas de madeira foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira, no Laboratório de Energia de Biomassa Florestal e Bioenergia e no Laboratório de Tecnologia de Argamassas (LATECA) da Universidade Federal do Paraná. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física das partículação física das partículas de mateira fora de TABELA 3.1-9.

Partícula	Densidade básica (kg/m³)	Densidade aparente (kg/m³)	Teor de umidade (%)	D ₅₀ (mm)
Compensado	381,63	173,83	11,68	3,54
Eucalipto	347,64	137,25	9,18	4,04
Pínus	314,90	207,72	20,43	3,64

TABELA 3.1-9 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

FONTE: A autora (2023).

A determinação da geometria das partículas foi obtida a partir da medida do comprimento, da largura e da espessura de 50 partículas para cada tipo de madeira de cada classe com o auxílio de um paquímetro digital. É importante destacar que este procedimento só

foi realizado para as partículas compreendidas nos intervalos de 4,75 mm a 9,50 mm; 2,36 mm a 4,75 mm; e 1,18 mm a 2,36 mm (FIGURA 3.1-12).

FIGURA 3.1-12 – PROCEDIMENTOS PARA REALIZAR A DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DAS PARTÍCULAS RECICLADAS



FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: [a] Materiais utilizados para as medições (sendo: papel milimetrado, paquímetro digital e pinça); [b] Partículas de pínus (de 4,75 mm a 9,50 mm); [c] Partículas de pínus (de 2,36 mm a 4,75 mm); [d] Partículas de pínus (de 1,18 mm a 2,36 mm).

Na sequência, foi calculado o Índice de Esbeltez (IdE), que consiste na relação entre o comprimento e a espessura das partículas; e a Razão de Planicidade (RP), que consiste na relação entre a largura e a espessura. A determinação da área superficial das partículas foi obtida a partir do cálculo sugerido por Moslemi (1974) conforme apresentado na equação (11).

$$a' = \frac{2x((exc) + (lxc) + (exl))}{cxlxexd}$$
(11)

Em que a' é a área superficial em cm²/g, e é a espessura das partículas (em cm), l é a largura das partículas (em cm), c é o comprimento das partículas (em cm), e d é a massa específica da madeira (em g/cm³).

Na TABELA 3.1-10 estão apresentados os valores médios da área superficial (a'), do Índice de Esbeltez (IdE) e da Razão de Planicidade (RP).

Partícula	Granulometria	Área superf (cm²/g)	Índice esbeltez (de IdE)	Razão de planicidade (RP)		
	4,75 mm a 9,50 mm	34,02	472,49	6,81	228,80	2,68	285,54
Compensad	2,36 mm a 4,75 mm	54,30	407,30	8,59	214,56	1,91	298,16
0	1,18 mm a 2,36 mm	127,41	323,31	11,00	207,10	1,76	225,05
	4,75 mm a 9,50 mm	32,26	568,42	6,05	236,08	1,73	334,24
Eucalipto	2,36 mm a 4,75 mm	55,01	419,71	10,63	225,31	1,80	376,24
	1,18 mm a 2,36 mm	146,63	374,49	15,51	251,22	2,03	312,58
	4,75 mm a 9,50 mm	29,30	579,48	5,09	251,24	1,94	359,55
Pínus	2,36 mm a 4,75 mm	79,02	405,37	6,74	256,95	1,88	310,95
	1,18 mm a 2,36 mm	163,38	391,39	10,89	287,97	1,90	332,01

TABELA 3.1-10 – ÁREA SUPERFICIAL (a'), ÍNDICE DE ESBELTEZ (IdE) E RAZÃO DE PLANICIDADE (RP) DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Valores subscritos à direita indicam o coeficiente de variação (%).

Observa-se que existe uma tendência – para os três tipos de madeira avaliados neste estudo – de aumento significativo da área superficial das partículas de madeira conforme a diminuição da dimensão da mesma.

O mesmo comportamento foi observado quanto ao índice de esbeltez (IdE). Quanto à razão de planicidade (RP), não foi verificado um comportamento em comum para os três tipos de madeira avaliados. É importante destacar que o coeficiente de variação obtido para os resultados representa a heterogeneidade das características das partículas obtidas após a moagem.

Conforme citado anteriormente, a determinação da geometria das partículas só foi realizada para as partículas compreendidas nos intervalos de 4,75 mm a 9,50 mm; 2,36 mm a 4,75 mm; e 1,18 mm a 2,36 mm.

Isto porque, para as partículas compreendidas nos intervalos de 0,60 mm a 1,18 mm; de 0,30 mm a 0,60 mm; e de 0,15 mm a 0,30 mm; devido à pequena dimensão, este procedimento mostrou-se inviável de ser realizado. Então, para estas partículas, foram realizadas imagens com Microscópio Estereoscópio Binocular (FIGURA 3.1-16 e FIGURA 3.1-15).

FIGURA 3.1-13 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA OBTER AS IMAGENS DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 3.1-14 – PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS COMPREENDIDAS NO INTERVALO DE 1,18 mm A 0,15 mm



FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Da esquerda para a direita: partículas de 0,60 mm a 1,18 mm; de 0,30 mm a 0,60 mm; e de 0,15 mm a 0,30 mm. [a] Partículas de compensado; [b] Partículas de eucalipto; [c] Partículas de pínus.

Foi realizado, também, o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Centro de Microscopia Eletrônica (CME/UFPR) com a finalidade de caracterizar anatomicamente as partículas de madeira. Para isso, as partículas de madeira foram aderidas ao porta amostras, com auxílio de fita dupla face de cobre (FIGURA 3.1-15), observadas e registradas (FIGURA 3.1-16) em microscópio eletrônico de varredura modelo Tescan Vega3 LMU.

FIGURA 3.1-15 – PREPARO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS PARA A REALIZAÇÃO DA IMAGEM DE MEV



FONTE: A autora (2023). LEGENDA: O diâmetro do porta amostra é de 10 mm.



FONTE: ROCHA (2017).

LEGENDA: [a] Compensado (com a ocorrência de laminação cruzada, conforme destacado); [b] Eucalipto (presença de raios e vasos com pontoações, conforme destacado); [c] Pínus (presença de pontoações, conforme destacado).

Quanto à caracterização química das partículas de madeira, foram realizadas a determinação do pH em extração em água quente de acordo com a TAPPI 252 (TAPPI, 2015), a determinação do material solúvel em água de acordo com a NBR 14577 (ABNT, 2017), a determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona de acordo com a NBR 14853 (ABNT, 2010), a determinação do material solúvel em hidróxido de sódio a 1% de acordo com a NBR 7990 (ABNT, 2010), a determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C de acordo com a NBR 13999 (ABNT, 2017).

Na TABELA 3.1-11 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização química das partículas de madeira considerando os três tipos de madeiras avaliados neste estudo – compensado, eucalipto e pínus – e a condição quanto ao pré-tratamento – sem e com.

Partícula	Pré-trat.	pH em extração em água quente	Teor de extrativos em água fria (%)	Teor de extrativos em água quente (%)	Teor de extrativos em NaOH (%)	Teor de extrativos totais (%)	Teor de lignina insolúvel em ácido (%)	Teor de cinzas (%)
	Sem	7.62	5,81	5,55	12,84	6,27	33,08	12,42
Commonsado	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	1,36	2,06	4,61	3,31	4,20		
Partícula Compensado Eucalipto Pínus	Com	7 34	4,18	4,50	11,24	3,25	34,19	8,17
	e o m	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	4,22	5,10	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	1,42	13,63	
	Sem	6,54	2,53	2,51	17,92	9,40	29,11	1,62
Fucalinto			5,46	0,28	2,30	0,83	2,16	5,27
Eucampio	Com	6,78	1,98	1,45	17,76	2,06	26,82	0,95
		-	0,91	9,35	1,39	6,51	1,57	4,32
	Sem	6,23	5,53	6,70	29,03	8,61	34,44	2,98
Dínus			0,73	0,06	1,37	3,60	3,92	16,45
1 mus	Com	6.12	2,35	5,68	22,01	6,15	33,57	2,91
Partícula Compensado Eucalipto Pínus		,	11,01	8,44	2,38	0,72	0,35	5,53

TABELA 3.1-11 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Valores subscritos à direita indicam o coeficiente de variação.

O procedimento de pré-tratamento das partículas de madeira está detalhado a seguir no item 3.2.1.2.

É possível verificar que a realização do pré-tratamento contribuiu para a diminuição dos valores obtidos nos ensaios de caracterização realizados (exceto para o teor de lignina insolúvel das partículas recicladas de compensado – cujos valores são similares). Como todas as composições desse estudo foram produzidas com as partículas recicladas pré-tratadas, estas foram objeto de análise e discussão.

Quanto ao pH, observa-se que os valores foram de 7,34, 6,78, e 6,12; para as partículas recicladas de compensado, eucalipto e pínus, respectivamente. Pesquisadores verificaram valores de pH entre 4,0 e 4,8 para seis espécies de pínus (PRATA, 2010), e de 5,3 para partículas de galhos naturais de pínus (influenciadas pela presença de cascas e acículas presentes no conteúdo do insumo) (PARCHEN, 2012).

Quanto ao teor de extrativos em água fria, observa-se que os valores foram de 4,18, 1,98 e 2,35; para as partículas recicladas de compensado, eucalipto e pínus, respectivamente. Pesquisadores verificaram valores entre 0,60 e 1,94 para quatro espécies de eucalipto (LATORRACA, 2000), entre 1,37 e 3,83 para seis espécies de pinus (PRATA, 2010), e entre 2,02 e 3,63 para oito espécies de pinus (TRIANOSKI, 2012). Observa-se que os valores encontrados para as partículas recicladas de eucalipto e pínus encontram-se próximos aos obtidos por outros pesquisadores.

Quanto ao teor de extrativos em água quente, observa-se que os valores foram de 4,50, 1,45 e 5,68; para as partículas recicladas de compensado, eucalipto e pínus, respectivamente. Pesquisadores verificaram valores entre 1,45 e 2,97 para quatro espécies de eucalipto (LATORRACA, 2000), entre 1,79 e 4,83 para seis espécies de pinus (PRATA, 2010), e entre 2,90 e 5,14 para oito espécies de pinus (TRIANOSKI, 2012). Observa-se que os valores encontrados para as partículas recicladas de eucalipto e pínus encontram-se próximos aos obtidos por outros pesquisadores.

Quanto ao teor de extrativos em NaOH, observa-se que os valores foram de 11,24, 17,76 e 22,01; para as partículas recicladas de compensado, eucalipto e pínus, respectivamente. Pesquisadores verificaram valores entre 12,00 e 15,50 para quatro espécies de eucalipto (LATORRACA, 2000), entre 9,24 e 16,73 para seis espécies de pinus (PRATA, 2010), e entre 9,31 e 16,15 para oito espécies de pinus (TRIANOSKI, 2012). Observa-se que os valores encontrados para as partículas recicladas de eucalipto e pínus encontram-se superiores aos obtidos por outros pesquisadores.

Quanto ao teor de extrativos totais, observa-se que os valores foram de 3,25, 2,06 e 6,15; para as partículas recicladas de compensado, eucalipto e pínus, respectivamente. Pesquisadores verificaram valores entre 1,51 e 4,52 para quatro espécies de eucalipto (LATORRACA, 2000), entre 3,48 e 9,60 para seis espécies de pinus (PRATA, 2010), e entre 3,34 e 8,82 para oito espécies de pinus (TRIANOSKI, 2012). Observa-se que os valores encontrados para as partículas recicladas de eucalipto e pínus encontram-se próximos aos obtidos por outros pesquisadores.

Quanto ao teor de lignina insolúvel em ácido, observa-se que os valores foram de 34,19, 26,82 e 33,57; para as partículas recicladas de compensado, eucalipto e pínus, respectivamente.

Quanto ao teor de cinzas, observa-se que os valores foram de 8,17, 0,95 e 2,91; para as partículas recicladas de compensado, eucalipto e pínus, respectivamente. Pesquisadores verificaram valores entre 0,15 e 0,23 para seis espécies de pinus (PRATA, 2010), e entre 0,14 e 0,32 para oito espécies de pinus (TRIANOSKI, 2012). Observa-se que os valores encontrados para as partículas recicladas de eucalipto e pínus encontram-se superiores aos obtidos por outros pesquisadores.

É importante destacar que as partículas utilizadas neste estudo são recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD) e, por isso, podem apresentar contaminantes e, até mesmo, terem suas características alteradas devido à exposição ao ambiente da construção civil. O fato de as partículas recicladas estudadas apresentarem pH entre 6,12 e 7,34, por exemplo, pode ter sido provocado pela presença de resíduos de materiais de construção, visto que estes têm como característica, a alcalinidade (PARCHEN, 2012).

3.1.4. Papel Kraft pardo

Foi utilizado o papel *Kraft* pardo obtido a partir de resíduos de saco de cimento descartado (FIGURA 3.1-17). Os resíduos de sacos de cimento foram coletados e abertos para que então fossem retirados o excesso de cimento.



FIGURA 3.1-17 – IMAGENS DOS TIPOS DE PAPEL KRAFT PARDO UTILIZADOS

FONTE: A autora (2023).

O papel pardo *Kraft* proveniente de resíduos de saco de cimento foi utilizado para a produção de placas nas dimensões de 30 x 40 cm.

3.1.5. Água

Foi utilizada água potável, proveniente da rede de abastecimento da cidade de Curitiba.

3.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS

Este primeiro estudo objetivou avaliar a influência da composição granulométrica das partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira. Para verificar a

influência da distribuição granulométrica das partículas de madeira recicladas foram produzidos compósitos e realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido (FIGURA 3.2-1).



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 3.2-1 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

3.2.1. Produção dos compósitos

3.2.1.1. Obtenção das diferentes composições granulométricas

A identificação e a classificação das diferentes composições granulométricas – apresentadas no item 3.1.3.1 – das partículas de madeira recicladas foram realizadas no intuito de viabilizar a verificação da influência destas nos compósitos. Por isso, a repetição da moagem foi realizada para que fosse possível obter o volume necessário de cada granulometria das partículas de madeira recicladas para a realização dos ensaios.

3.2.1.2. Pré-tratamento realizado nas partículas de madeira recicladas

O pré-tratamento efetuado em todas as partículas de madeira recicladas foi realizado de acordo com o descrito por Lima (2009). Este procedimento consistiu na imersão das partículas de madeira recicladas em água fria pelo período de 48 horas. A proporção de água utilizada foi de 10:1, ou seja, 10 litros de água para cada 1 kg de madeira. Em seguida, o material foi espalhado em uma área coberta e passou por um período de secagem ao ar livre, por 72 horas, para que então fosse colocado em estufa à 100°C por 24 horas para completar sua secagem (FIGURA 3.2-2).

FIGURA 3.2-2 – PROCEDIMENTO DE PRÉ-TRATAMENTO REALIZADO NAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS



FONTE: A autora (2023).

Como as partículas encontravam-se secas, para a dosagem dos compósitos, foi realizada a compensação de água proposta por Simatupang (1979) conforme apresentado na equação (12).

$$Ca = R_{a/agl} \times C + (PSF - U) \times M \tag{12}$$

Em que *Ca* é o consumo de água (g); $R_{a/agl}$ é a relação água/aglomerante; C é o consumo de aglomerante (g); PSF é o ponto de saturação das fibras (adotado como 30%); U é o teor de umidade da madeira (%); M é a massa de madeira (g).

3.2.1.3. Proporção dos materiais

Foram produzidos compósitos de cimento-madeira (TABELA 3.2-1) e de gessomadeira (TABELA 3.2-2). As relações água/aglomerante (a/agl, em massa) foram fixadas em 0,50 para os compósitos com cimento (PARCHEN, 2012) e em 0,70 para os compósitos com gesso (HERNÁNDEZ-OLIVARES *et al.*, 1999). O teor do aditivo acelerador de pega foi fixado em 5% (ROCHA, 2017) e utilizado apenas nas composições produzidas com cimento. Os tipos de madeira utilizados são o compensado, o eucalipto e o pínus, conforme explicado no item 3.1.3. As composições granulométricas utilizadas para a produção dos compósitos são as descritas na TABELA 3.1-8. A proporção aglomerante/madeira (agl/m) variou em 7,5%, 11% e 15%, com relação à massa do aglomerante (ROCHA, 2017). Foram produzidas amostras de referência (0% de madeira) para os compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira.

TABELA 3.2-1 – COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO E MADEIRA PRODUZIDOS PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS

(continua)	١
(communa	,

Aglomerante	Relação a/agl	Aditivo Acelerador	Madeira	Granulometria	Proporção agl/m
			-	-	0%
Cimento Portland		0,05			7,50%
	0,5			CG01	11%
					15%
			Compensado	CG03 CGP1,2	7,50%
					11%
					15%
					7,50%
					11%

(conc	lusão)

Aglomerante	Relação a/agl	Aditivo Acelerador	Madeira	Granulometria	Proporção agl/m
				CG01	7,50%
					11%
					15%
					7,50%
	0,5	0.05	Eucalipto	CG03	11%
					15%
				CGP1,2	7,50%
					11%
Cincente Dertland					15%
Cimento Portiand		0,03		CG01	7,50%
					11%
					15%
					7,50%
			Pínus	CG03	11%
					15%
					7,50%
				CGP1,2	11%
					15%

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: As composições com proporção aglomerante/madeira de 0% representam as amostras de referência.

TABELA 3.2-2 – COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS DE GESSO E MADEIRA PRODUZIDOS PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS

, (continua					
Aglomerante	Relação a/agl	Aditivo Acelerador	Madeira	Granulometria	Proporção agl/m
			-	-	0%
					7,50%
				CG01	11%
					15%
					7,50%
			Compensado	CG03	11%
					15%
			0%	CGP1,2	7,50%
					11%
Gesso	0,7	0%			15%
				CG01	7,50%
					11%
					15%
					7,50%
			Eucalipto	CG03	11%
					15%
					7,50%
				CGP1,2	11%
					15%

Aglomerante	Relação a/agl	Aditivo Acelerador	Madeira	Granulometria	Proporção agl/m
Gesso	0,7	0%			7,50%
				CG01	11%
					15%
					7,50%
			Pínus	CG03	11%
					15%
					7,50%
				CGP1,2	11%
					15%

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: As composições com proporção aglomerante/madeira de 0% representam as amostras de referência.

A partir das TABELA 3.2-1 e TABELA 3.2-2 é possível verificar que foram produzidos 56 traços nesta etapa do estudo.

3.2.1.4. Procedimentos de produção

A produção dos compósitos de cimento-madeira foi realizada a partir de uma adaptação na norma NBR 16541 (ABNT, 2016). Adicionou-se primeiramente o aglomerante e 75% da quantidade de água com o aditivo, realizando a mistura em velocidade baixa na argamassadeira por 30s. Em seguida, foi realizada a raspagem das laterais da cuba da argamassadeira e adicionada a quantidade restante de água realizando a mistura em velocidade alta por 30s. Na sequência, adicionou-se a madeira gradativamente durante 30s, sem parar a mistura. A velocidade foi aumentada para alta por mais 30s.

Para a produção dos compósitos de gesso-madeira, adaptaram-se os procedimentos indicados pela NBR 12128 (ABNT, 2019). Primeiramente, foi adicionada a água e, na sequência, realizou-se o polvilhamento do gesso durante 1 min. A composição permaneceu em repouso durante 2 min. Em seguida, foi realizada a mistura na argamassadeira em velocidade baixa e, simultaneamente, adicionou-se a madeira durante 30s. A argamassadeira foi mantida ligada em velocidade baixa por mais 30s. Ao término, todas as composições foram homogeneizadas manualmente por 30s para que então fossem realizados os ensaios no estado fresco, a moldagem dos corpos de prova e os ensaios no estado endurecido.

3.2.2. Ensaios realizados

(conclusão)

Os compósitos de madeira produzidos foram avaliados quanto às propriedades físicas e mecânicas através de ensaios no estado fresco e no estado endurecido. Nas TABELA 3.2-3 e

TABELA 3.2-4 estão listados os ensaios, sua respectiva norma, a idade e a quantidade de amostras produzidas de cada traço para a realização do ensaio.

TABLEA 5.2-5 - ENGRIOS REALIZADOS NO ESTADO I RESCO					
Ensaios	Norma	Idade (dia)	Amostra (unid.)		
Determinação de tempo de naço	NBR 16607 (ABNT, 2018)		1		
Determinação do tempo de pega	NBR 12128 (ABNT, 2019)	-	1		
Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)	-	1		
Determinação da densidade de massa fresca	NBR 13278 (ABNT, 2005)	-	1		
FONTE: A autora (2023).					

TARELA 3.2.3 ENSALOS REALIZADOS NO ESTADO ERESCO

TABELA 3.2-4 - ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECID	0
-------------------------------------------------------	---

Ensaios	Norma	Idade (dia)	Amostra (unid.)		
Determinação da densidade de massa	NBR 13280 (ABNT, 2005)	28	3		
Determinação da resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	28	3		
Determinação da resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	28	6		
FONTE: A autora (2023)					

FONTE: A autora (2023).

É importante destacar que os ensaios no estado fresco foram realizados apenas nas composições com proporção aglomerante/madeira de 0% e 7,5%. Isto porque, a execução destes em compósitos com maior quantidade de partículas de madeira recicladas (neste estudo representado pelas proporções 11% e 15%) dificulta a execução dos ensaios além de, muitas vezes, impossibilitar a leitura dos resultados devido à presença das partículas na composição. Por outro lado, os ensaios no estado endurecido foram realizados em todos os compósitos produzidos.

O delineamento estatístico utilizado foi análise fatorial com ênfase na natureza dos tratamentos, sendo estes: o tipo de partícula (compensado, eucalipto e pínus), a composição granulométrica (CG01, CG03 e CGP1,2) e a proporção de partículas de madeira recicladas (0% - 7,5% - 11% - 15%). Para a comparação entre as médias, utilizou-se ANOVA em conjunto com o teste de Tukey, no nível de probabilidade de 95%. Desta maneira, é possível identificar simultaneamente o efeito de dois ou mais fatores através das interações entre as variáveis (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2004; BANZATTO; KRONKA, 2006).

3.3. ESTUDO INFLUÊNCIA DO ADITIVO DA **SUPERPLASTIFICANTE** EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

Este segundo estudo objetivou avaliar a influência do aditivo superplastificante em compósitos com partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira. Para verificar a influência do aditivo superplastificante foram produzidos compósitos e realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido (FIGURA 3.3-1).

consistência superior ao limite mínimo aglomerante/madeira com índice de Proporção Corpo de prova prismático 4x4x16cm³ Densidade de massa Resistência à tração na flexão Estado endurecido Resistência à compressão Avaliação das propriedades Índice de consistência Densidade de massa Estado fresco 2,5 Proporção aglomerante/madeira 2,0(em volume) 1,51,0referência Amostra 0,0de granulométric Composição CG 01 Pínus Partícula de madeira Eucalipto Compensado Aditivo químico (1% de superplastifi cante) Relação a/g Aditivo químico (5% de acelerador de pega) = 0,7Gesso Aglom. Relação a/c = 0,5 superplastifi cante) Cimento Portland Aditivo químico (1% de

FONTE: A autora (2023).

FIGURA 3.3-1 – FLUXOGRAMA DO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS A partir dos resultados descritos no item 4.1 e das conclusões apresentadas no item 5.1.1, foram fixados os parâmetros apresentados na TABELA 3.3-1.

TABELA 3.3-1 – PARÂMETROS FIXADOS PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Parâmetro				
Dronorção modeiro/oglomorente	A partir de 15% (em massa)			
riopoição inadena/agiomerante	A partir de 1,0 (em volume)			
Composição granulométrica	CG01			
Índias da consistância mínimo	305 mm para os compósitos cimento-madeira			
	310 mm para os compósitos gesso-madeira			
FONTE: A autora (2023)				

FONTE: A autora (2023).

A proporção aglomerante/madeira foi adotada a partir de 15% (em massa) pois os compósitos produzidos com cimento Portland ou com gesso apresentaram as menores densidades de massa endurecida quando foram produzidas com essa proporção. A composição granulométrica CG01 permitiu que os compósitos produzidos com cimento Portland ou com gesso apresentassem as maiores resistências à tração na flexão, em alguns casos, superiores à amostra de referência. Ambas as constatações estão apresentadas e discutidas no item 4.1.3.

No intuito de padronizar o volume de partículas de madeira recicladas presente em cada composição – para que seja possível comparar a influência de cada um dos tipos utilizados –, as proporções madeira/aglomerante passaram a ser consideradas em volume a partir da proporção de 15% (em massa) obtida na etapa anterior (TABELA 3.3-2).

	The de Medeine	Proporção madeir	a/aglomerante
Aglomerante	Tipo de Madeira	Em massa	Em volume
		13%	1,0
	Commencedo	19%	1,5
	Compensado	25%	2,0
		32%	2,5
	Eucalipto	12%	1,0
Cimento		17%	1,5
Cimento		23%	2,0
		29%	2,5
		10%	1,0
	Diana	16%	1,5
	Pinus	21%	2,0
		26%	2,5

TABELA 3.3-2 – RELAÇÃO ENTRE A PROPORÇÃO MADEIRA/AGLOMERANTE EM MASSA E EM VOLUME PARA CADA TIPO DE MADEIRA AVALIADO (continua)

A alono ano más	Tino de Medeiro	Proporção madeir	a/aglomerante
Agiomerante	Tipo de Madeira	Em massa	Em volume
		15%	1,0
	Componendo	22%	1,5
	Compensado	29%	2,0
		36%	2,5
	Eucalipto	13%	1,0
Carro		20%	1,5
Gesso		26%	2,0
		33%	2,5
		12%	1,0
	D.	18%	1,5
	Pinus	24%	2,0
		30%	2,5

FONTE: A autora (2023).

As discrepâncias observadas entre as proporções em volume para os diferentes tipos de madeira ocorrem por influência da massa específica de cada uma (conforme apresentado anteriormente na TABELA 3.1-9).

Quanto ao índice de consistência, conforme descrito por Rocha (2017) no item 3.2.6, os compósitos de cimento-madeira produzidos com relação a/c de 0,50 não apresentaram viabilidade de produção de placas. Naquele estudo, foi necessária a alteração da relação a/c de 0,50 para 0,65 para proporcionar a trabalhabilidade adequada. Por isso, neste estudo, foi determinado o índice de consistência mínimo, a partir de relação a/c de 0,65, obtido por Rocha (2017) para a produção de compósitos cimento-madeira e gesso-madeira, e adotado como critério de viabilidade para a produção de placas.

Para verificar a influência do aditivo superplastificante foram produzidos compósitos de madeira e realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

3.3.1. Produção dos compósitos

3.3.1.1. Proporção dos materiais

Foram produzidos compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira. As relações água/aglomerante (em massa) foram fixadas em 0,50 para compósitos de cimento-madeira e em 0,70 para compósitos de gesso-madeira, conforme justificado no item 3.2.1.3. Assim como

(conclusão)

realizado no item 3.2, as partículas de madeira recicladas também foram pré-tratadas conforme explicado no item 3.2.1.2. O teor de aditivo acelerador de pega utilizado para a produção dos compósitos de cimento-madeira foi fixado em 5% com relação à massa do cimento.

Nesta etapa do estudo, conforme explicado na TABELA 3.3-1, foi utilizada apenas a composição granulométrica CG01 e a proporção aglomerante/madeira (em massa) a partir de 15%. Ou seja, as proporções aglomerante/madeira utilizadas iniciaram em 15% com aumento gradual até o limite em que a composição atingiu o índice de consistência inferior ao estipulado na TABELA 3.3-1. Conforme explicado no item 3.1.2, o teor do aditivo superplastificante utilizado foi de 1% com relação à massa do aglomerante (teor máximo recomendado pelo fabricante).

As composições dos compósitos que foram produzidos estão apresentadas na TABELA 3.3-3 e estão especificados os aglomerantes utilizados, a relação água/aglomerante (em massa), os aditivos químicos e seus respectivos teores (em massa com relação à massa do aglomerante), o tipo de madeira, a composição granulométrica e a proporção agl/m (aglomerante/madeira em volume).

TABELA 3.3-3 – COMPOSIÇÕES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA PRODUZIDOS PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE (continua)

Aglomerante	Relação	Aditivo Químicos		Madeira	Cranulamatria	Proporção agl/m
	a/agl	AC	SUP	Wadena	Granuloinetria	i roporçao agi/m
				-	-	0,00
						1,00
Cimento 0 Portland				Compensado	CG01	1,50
						2,00
	0.5	50/	10/	10/	CG01	1,00
	0,5	3%0	70 170	Eucalipto		1,50
						2,00
					CG01	1,00
				Pínus		1,50
						2,00

Aglamananta	Relação	Aditivo Químicos		Madaina	Cuenciemetrie		
Agiomerante	a/agl	AC	SUP	Madelra	Granulometria	rroporçao agı/m	
Gesso	0,7	0%	1%	-	-	0,00	
				Compensado	CG01	1,00	
						1,50	
						2,00	
						2,50	
				Eucalipto	CG01	1,00	
						1,50	
						2,00	
						2,50	
				Pínus	CG01	1,00	
						1,50	
						2,00	
						2,50	

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: As composições com proporção madeira/aglomerante de 0,00 representam as amostras de referência.

A partir da TABELA 3.3-3 é possível verificar que foram produzidos 23 traços nesta etapa do estudo.

3.3.1.2. Procedimentos de produção

A produção dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira foi realizada de acordo com o detalhado no item 3.2.1.4.

3.3.2. Ensaios realizados

Os compósitos de madeira produzidos foram avaliados quanto às propriedades físicas e mecânicas através de ensaios no estado fresco e no estado endurecido. Nas TABELA 3.3-4 e TABELA 3.3-5 estão listados os ensaios, sua respectiva norma, a idade e a quantidade de amostras produzidas de cada traço para a realização do ensaio.

Ensaios	Norma	Idade (dias)	Amostras (unid.)	
Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)	-	1	
Determinação da densidade de massa fresca	NBR 13278 (ABNT, 2005)	-	1	

TABELA 3.3-4 – ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO

FONTE: A autora (2023).

(conclusão)

Ensaios	Norma	Idade (dias)	Amostras (unid.)
Determinação da densidade de massa endurecida	NBR 13280 (ABNT, 2005)	28	3
Determinação da resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	28	3
Determinação da resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	28	6

TABELA 3.3-5 - ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO

FONTE: A autora (2023).

Para o ensaio de determinação de massa endurecida, as amostras foram avaliadas em duas condições. A primeira denominada *in natura* consistiu em determinar a massa endurecida na condição natural do corpo de prova com idade de 27 dias. A segunda condição denominada "seca" consistiu em manter o corpo de prova por 24 h em estufa a 40°C – do 27° dia ao 28° dia de idade – e determinar a massa endurecida do corpo de prova.

O delineamento estatístico utilizado foi a análise fatorial com ênfase na natureza dos tratamentos, sendo estes: o tipo de partícula (compensado, eucalipto e pínus) e a proporção de partículas de madeira recicladas (0,0-1,0-1,5-2,0-2,5). Para a comparação entre as médias, foi utilizada ANOVA em conjunto com o teste de Tukey, no nível de probabilidade de 95%.

3.4. ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

Este terceiro estudo objetiva avaliar o empacotamento das partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD), no intuito de compreender o comportamento destas partículas visando a redução do consumo de aglomerante para a produção de compósitos de madeira. Para isto, foram comparadas as curvas granulométricas CG01 (conforme apresentado anteriormente na TABELA 3.1-8 e FIGURA 3.1-10) com modelos da literatura e, na sequência, foi aplicado o modelo de Alfred (modelo de Andreasen modificado ou de Funk e Dinger) para obter as proporções dos materiais necessários para produzir um compósito com maior densidade de empacotamento (FIGURA 3.4-1).





3.4.1.1. Comparação das curvas de distribuição granulométrica com os modelos

As curvas de distribuição granulométrica CG01 das partículas de madeira recicladas (apresentadas anteriormente na TABELA 3.1-8 e FIGURA 3.1-10) foram comparadas com as curvas ótimas determinadas a partir de três modelos de empacotamento de partículas.

Conforme descrito no item 2.3.2.2.1, o primeiro modelo analisado foi o proposto por Fuller e Thompson (1907), e descreve uma curva de distribuição granulométrica contínua conforme apresentado na equação (5) sendo adotado módulo de distribuição (q) igual a 0,50.

O modelo de Andreasen e Andersen (1930) foi utilizado e, também, é descrito pela equação (5). Entretanto, o valor q não é fixo, podendo variar entre 0,33 e 0,50.

O terceiro e último modelo analisado foi o proposto por Funk e Dinger (1980) que observaram que os modelos anteriores não consideravam um diâmetro mínimo de partícula, assumindo partículas infinitamente pequenas para compor os sistemas, o que não representa as estruturas reais dos grãos. Portanto, eles propuseram a equação (6), conhecida também como modelo de Alfred ou modelo de Andreasen modificado. Simulações computacionais mostraram que um valor de 0,37 para o valor q leva à densidade máxima de empacotamento do conjunto granular (FUNK e DINGER, 1980). Assim, este valor de q foi adotado tanto para o segundo (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930) quanto para o terceiro (FUNK e DINGER, 1980) modelo estudado.

É importante ressaltar que esses modelos consideram apenas o diâmetro da partícula, não considerando nem sua forma e nem sua textura na determinação da curva ideal de distribuição granulométrica (LONDERO *et al.*, 2017).

3.4.1.2. Determinação experimental da densidade de empacotamento

As partículas de madeira recicladas estudadas foram divididas em 6 classes (TABELA 3.4-1), esta divisão foi realizada a partir do peneiramento. A massa unitária de cada classe de partículas foi determinada de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) (conforme apresentado na TABELA 3.1-9). Todo o material passante pela peneira de 0,15 mm foi descartado.

Classe	Tamanho das partículas
1	De 4,75 mm a 9,50 mm
2	De 2,36 mm a 4,75 mm
3	De 1,18 mm a 2,36 mm
4	De 0,60 mm a 1,18 mm
5	De 0,30 mm a 0,60 mm
6	De 0,15 mm a 0,30 mm
	FONTE: A autora (2023).

TABELA 3.4-1 – CLASSES DE TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

A densidade de empacotamento das partículas de madeira recicladas foi determinada de acordo com a equação (13).

$$\beta = 1 - IV \tag{13}$$

Em que β é a densidade de empacotamento experimental; o IV (índice de vazios) é calculado de acordo com a norma NBR 16972 (ABNT, 2021), conforme apresentado por Campos *et al.* (2020a), Campos *et al.* (2020b), Klein *et al.* (2020), Londero *et al.* (2021).

3.4.1.3. Previsão e determinação experimental da densidade de empacotamento para as curvas de distribuição granulométrica

As densidades de empacotamento das curvas de distribuição granulométrica das partículas de madeira recicladas e as curvas obtidas a partir dos modelos de empacotamento de partículas (FULLER e THOMPSON, 1907; ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) foram calculadas usando o modelo de empacotamento compressível (*Compressible Packing Model* – CPM) (DE LARRARD e SEDRAN, 1994; DE LARRARD, 1999).

Este modelo é baseado na densidade de empacotamento de cada classe de tamanho individual (TABELA 3.4-1), na curva de distribuição granulométrica das partículas e na energia de compactação utilizada para processar os conjuntos granulares.

O CPM determina que o cálculo da densidade de empacotamento virtual (γ i) e da densidade de empacotamento real (Φ) sejam realizados conforme as equações (7), (8), (9) e (10). Essas equações são baseadas em três parâmetros: o tamanho de partícula de cada classe (di); a densidade de empacotamento de cada classe (β i); e o volume de cada classe (yi).

O índice de compactação necessário para o cálculo do CPM foi adotado de acordo com as recomendações do autor para compactação com haste (K = 4,5) (DE LARRARD e SEDRAN, 1994; DE LARRARD, 1999).

Assim, para cada tipo de madeira, foi calculada a densidade de empacotamento de quatro curvas de distribuição granulométrica, resultando em um total de 12 valores de densidade de empacotamento. Ressalta-se que, em todas as curvas, as partículas foram consideradas quanto ao seu volume.

A densidade de empacotamento experimental das curvas de distribuição granulométrica das partículas de madeira recicladas e as fornecidas pelos modelos de empacotamento de partículas (FULLER e THOMPSON, 1907; ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) também foram determinadas de acordo com a equação (13) apresentada anteriormente. A massa unitária dos conjuntos granulares foi determinada de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Foi utilizada a massa específica previamente indicada na TABELA 3.1-9.

3.4.2 Estudo do empacotamento a partir da aplicação do modelo de Alfred no proporcionamento dos materiais para a produção de compósitos

A partir do desenvolvimento do item 3.4.1 cujos resultados estão apresentados e discutidos no item 4.3.1., observou-se que dentre os três modelos de empacotamento avaliados, o modelo de Alfred (modelo de Andreasen modificado ou de Funk e Dinger) apresentou a maior densidade de empacotamento experimental (FIGURA 4.3-4b) para os três tipos de partículas de madeira recicladas utilizadas neste estudo.

Nesta etapa foi realizado o estudo do empacotamento a partir da aplicação do modelo de Alfred no proporcionamento dos materiais para a produção de compósitos. A equação (6) descreve a curva proposta por Funk e Dinger (1980), que possui como dados de entrada: D como o diâmetro da partícula, igual à abertura da peneira (mm); $D_{máx}$ como o diâmetro da maior partícula (mm); $D_{mín}$ como o diâmetro da menor partícula (mm); e q como o coeficiente de distribuição.

Ao longo do tempo, diferentes estudos (FUNK e DINGER, 1994; FENNIS e WALRAVEN, 2012) foram realizados utilizando o modelo de Alfred e verificou-se que o q = 0,37 (coeficiente de distribuição) proporciona a maior densidade de empacotamento, a menor porosidade e, consequentemente, demanda a menor quantidade de água e de aglomerante. Entretanto, quando considerado o comportamento no estado fresco, observou-se que as composições produzidas com alta densidade de empacotamento tornam-se um grande desafio. Por isso, sugere-se adotar o coeficiente de distribuição (q) mais baixo para situações em que

seja adequada obter composições com alta fluidez. Posteriormente, alguns pesquisadores (KUMAR e SANTHANAM, 2003) concluíram que o q (coeficiente de distribuição) pode variar de 0,21 a 0,37, em que os coeficientes mais próximos de 0,21 são indicados para composições de alta fluidez e de 0,37 para composições secas.

Na FIGURA 3.4-2 estão apresentadas as composições granulométricas dos materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho (conforme apresentando no item 3.1), sendo: o cimento Portland, o gesso e as partículas de madeira recicladas (de compensado, eucalipto e pinus). Estão presentes, também, duas composições granulométricas do modelo de Alfred, uma adotando o q = 0,21 e outra adotando o q = 0,37.



A partir das características dos materiais (FIGURA 3.4-2), foi desenvolvido – pelo Prof. Dr. Emilio Graciliano Ferreira Mercuri – um código utilizando o software *Python*[®] – uma linguagem de programação que permite trabalhar rapidamente e capaz de integrar sistemas de modo eficaz – com o intuito de combinar as composições granulométricas dos diferentes materiais para obter um conjunto que se aproximasse das curvas propostas pelo modelo de Alfred (para q = 0,21 e q = 0,37).

Na TABELA 3.4-2 estão apresentadas as informações consideradas como dados de entrada para o código desenvolvido e as identificações das combinações realizadas.
Identificação	Composição	Aglon	nerante	Partícula de madeira	q (coeficiente de distribuição)
B21CC	Binária	Cimento	-	Compensado	0,21
B21CE	Binária	Cimento	-	Eucalipto	0,21
B21CP	Binária	Cimento	-	Pinus	0,21
B21GC	Binária	-	Gesso	Compensado	0,21
B21GE	Binária	-	Gesso	Eucalipto	0,21
B21GP	Binária	-	Gesso	Pinus	0,21
T21CGC	Ternária	Cimento	Gesso	Compensado	0,21
T21CGE	Ternária	Cimento	Gesso	Eucalipto	0,21
T21CGP	Ternária	Cimento	Gesso	Pinus	0,21
B37CC	Binária	Cimento	-	Compensado	0,37
B37CE	Binária	Cimento	-	Eucalipto	0,37
B37CP	Binária	Cimento	-	Pinus	0,37
B37GC	Binária	-	Gesso	Compensado	0,37
B37GE	Binária	-	Gesso	Eucalipto	0,37
B37GP	Binária	-	Gesso	Pinus	0,37
T37CGC	Ternária	Cimento	Gesso	Compensado	0,37
T37CGE	Ternária	Cimento	Gesso	Eucalipto	0,37
T37CGP	Ternária	Cimento	Gesso	Pinus	0,37

TABELA 3.4-2 – DADOS DE ENTRADA PARA O CÓDIGO DESENVOLVIDO EM PHYTON®

FONTE: A autora (2023).

A aplicação do código desenvolvido em *Python*[®] resultou nas proporções a serem utilizadas para cada material (aglomerantes e partículas de madeira recicladas) para obter os conjuntos com menor (q = 0,21) ou maior (q = 0,37) densidade de empacotamento a partir do modelo de Alfred.

3.5. ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS

Para verificar o desempenho das placas de vedação verticais internas produzidas com os compósitos de madeira desenvolvidos, o estudo foi subdividido (FIGURA 3.5-1) na avaliação das propriedades físicas e mecânicas de acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021) e das propriedades químicas; e, na avaliação do desempenho – quanto à verificação da resistência a impactos de corpo duro (de acordo com a NBR 15575-4 Anexo B (ABNT, 2021) e NBR 11675 (ABNT, 2016)), à verificação da resistência a impactos de corpo mole (de acordo com a NBR 11675 (ABNT, 2016)), à verificação da resistência a impactos de corpo mole (de acordo com a NBR 11675 (ABNT, 2016)), à solicitações de peças suspensas (de acordo com a NBR 15575-4 Anexo A (ABNT, 2021)), à dureza superficial (de acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021)) – na avaliação do desempenho acústico de acordo com a ISO 10140-2 (ISO, 2021), e na avaliação experimental do desempenho térmico.



3.5.1. Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e químicas

3.5.1.1. Produção das placas

A partir dos resultados obtidos no item 4.3.2 - que determinou as proporções madeira/aglomerante que resultam na maior fluidez dos conjuntos (q = 0,21) a partir do modelo de Alfred – realizou-se a produção das placas. Para efeito comparativo, foram produzidas, também, placas com proporções madeira/aglomerante inferior e outra superior ao determinado no item 4.3.2 e cujas composições foram produzidas conforme detalhado anteriormente no item 3.3 na TABELA 3.3-2 e os resultados discutidos conforme apresentado no item 4.2. Foram confeccionadas placas de vedação vertical internas com $300 \times 400 \times 12,5$ mm com os compósitos. As composições dos compósitos que foram produzidas estão apresentadas na TABELA 3.5-1.

Aglom.	Relação água/aglom.	Tipo de Madeira	Composição Granulométrica	A qu	ditivo úmico	Pro	porçi	ăo ma (em	deira/a volum	glomer e)	ante
	(em massa)			AC	SUP	0,0	1,5	1,86	2,0	2,22	2,5
			REF	Х	Х	Х	-	-	-	-	-
				Х	Х	-	Х	-	-	-	-
		Compensado	CG01	Х	Х	-	-	Х	-	-	-
				Х	Х	-	-	-	Х	-	-
Cimento	0.5			Х	Х	-	Х	-	-	-	-
Portland	0,5	Eucalipto	CG01	Х	Х	-	-	Х	-	-	-
				Х	Х	-	-	-	Х	-	-
			CG01		Х	-	Х	-	-	-	-
		Pínus	CG01 X X		Х	-	-	Х	-	-	-
				Х	Х	-	-	-	Х	-	-
			REF		Х	Х	-	-	-	-	-
				-	Х	-	-	-	Х	-	-
		Compensado	CG01	-	Х	-	-	-	-	Х	-
				-	Х	-	-	-	-	-	Х
Gesso	0.7			-	Х	-	-	-	Х	-	-
00350	0,7	Eucalipto	CG01	-	Х	-	-	-	-	Х	-
				-	Х	-	-	-	-	-	Х
				-	Х	-	-	-	Х	-	-
		Pínus	CG01	-	Х	-	-	-	-	Х	-
				-	Х	-	-	-	-	-	Х

TABELA 3.5-1 – COMPOSIÇÕES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA PRODUZIDOS PARA O ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS COM 0,30 m x 0,40 x 0,0125 m

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: As composições com proporção madeira/aglomerante de 0,00 representam as amostras de referência.

A partir da TABELA 3.5-1 é possível verificar que foram produzidos 20 traços nesta etapa do estudo.

Para a confecção das placas, os procedimentos de produção realizados foram os mesmos detalhados no item 3.2.1.4. Para a moldagem das placas, foram produzidas formas com gabaritos metálicos e utilizando plástico filme como fundo da forma (FIGURA 3.5-2).

FIGURA 3.5-2 – FORMAS COM GABARITOS METÁLICOS PARA AS PRODUÇÃO DAS PLACAS E USO DE PLÁSTICO FILME COMO FUNDO



FONTE: A autora (2023).

Depois de produzido o compósito, o material foi lançado na forma, espalhado com uma espátula, e alisado com régua metálica para propiciar o acabamento adequado (FIGURA 3.5-3). As moldagens foram realizadas nas dependências do LAME UFPR.



FIGURA 3.5-3 – MOLDAGEM DAS PLACAS DE VEDAÇÃO COM DIMENSÕES DE 0,40x0,30x0,0125m

FONTE: A autora (2023).

Para as proporções madeira/aglomerante de 2,0 (para o compósito cimento-madeira) e de 2,5 (para o compósito gesso-madeira) foram produzidas, ainda, placas com papel *Kraft* nas duas faces. O papel *Kraft* (conforme explicado no item 3.1.4) utilizado foi proveniente de resíduos de sacos de cimento (FIGURA 3.5-4).



FIGURA 3.5-4 – CONFIGURAÇÃO DAS PLACAS DE VEDAÇÃO COM DIMENSÕES DE 0,40x0,30x0,0125m PRODUZIDAS COM PAPEL *KRAFT*

FONTE: A autora (2023).

Durante 72h (FIGURA 3.5-5), as placas foram acondicionadas na horizontal em local seguro e ventilado, na sequência, foram desformadas e mantidas na horizontal até 28 dias.



FIGURA 3.5-5 - ACONDICIONAMENTO DAS PLACAS COM DIMENSÕES DE 0,40x0,30x0,0125m

FONTE: A autora (2023).

3.5.1.2. Ensaios realizados

As placas que foram produzidas com os compósitos de madeira foram avaliadas quanto às propriedades físicas e mecânicas de acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021) e às propriedades químicas a partir do ensaio de difração de raios-X (DRX).

Na TABELA 3.5-2 estão listados os ensaios, suas respectivas normas, a idade e quantidades de amostras.

TABELA 3.5-2 – ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E QUÍMICOS REALIZADOS NAS PLACAS PRODUZIDAS COM OS COMPÓSITOS

Ensaios	Norma	Idade (dias)	Amostras (unid.)
Determinação da densidade superficial de massa	NBR 14715-2 (ABNT, 2021)	28	3
Determinação da resistência à ruptura na flexão	NBR 14715-2 (ABNT, 2021)	28	3
Ensaio de difração de raios-X (DRX)	Análise qualitativa pelo método do pó total	28	1
FONTE	: A autora (2023).		

Foram produzidos 3 corpos de prova para cada traço para a realização dos ensaios de densidade superficial de massa e de resistência à ruptura na flexão. Além disso, para a determinação das características geométricas, foi utilizado um paquímetro com resolução de 0,1 mm e uma régua metálica com resolução de 1,0 mm. Foi realizada a média aritmética da medição da espessura em seis pontos, da largura e do comprimento em três pontos.

Para a densidade de massa superficial, foi utilizada uma balança com resolução de 0,1 g, estufa ventilada a 40±4°C e régua metálica com resolução de 1,0 mm para a determinação da massa e da área dos corpos de prova.

Para a determinação da resistência à ruptura na flexão (FIGURA 3.5-6), foi utilizado o pórtico específico para a realização do ensaio com aplicação de carga à velocidade de 250±10 N/min.

Para a realização dos ensaios, as amostras permaneceram em estufa ventilada a 40±4°C por 24 h até a realização do ensaio.

O delineamento estatístico utilizado foi a análise fatorial com ênfase na natureza dos tratamentos, sendo estes: o tipo de partícula (compensado, eucalipto e pínus) e a proporção de partículas de madeira recicladas (1,50, 1,86 e 2,00 para os compósitos com cimento, e 2,00, 2,22 e 2,50 para os compósitos com gesso). Para a comparação entre as médias, será utilizada ANOVA em conjunto com o teste de Tukey, no nível de probabilidade de 95%.



FIGURA 3.5-6 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À RUPTURA NA FLEXÃO (NA TRANSVERSAL)

FONTE: A autora (2023).

Para a avaliação das propriedades químicas dos compósitos, foi realizado o ensaio de difração de raios-X (DRX). Na idade determinada de 28 dias, as amostras tiveram suas reações de hidratação paralisadas – cujo procedimento foi realizado conforme descrito por Duart (2008). As amostras foram imergidas em álcool etílico p.a. por 24 horas, e, após esse período, foram retiradas do álcool e colocadas em estufa a 40°C por 24 horas. Ao fim do processo, as amostras foram armazenadas em recipiente plástico identificado e colocadas em um dessecador contendo sílica gel até o momento de realização do ensaio.

O ensaio de DRX foi realizado no LAMIR a partir da análise qualitativa pelo método do pó total. Foi utilizado o equipamento Panalytical Emyrean X-Ray Diffractometer de potência igual a 40 kV/30 mA. A mensuração foi realizada entre 3,5° e 70° 2θ, com passo angular de 0,02° 2θ e tempo por passo de 10 s. A interpretação dos difratogramas foi realizada por meio do software X'Pert HighScore, da PANalytical, utilizando a base de dados do International Centre for Diffraction Data (ICDD). Quando analisados e interpretados, os difratogramas de DRX permitem a identificação dos principais constituintes cristalinos dos materiais.

3.5.2. Avaliação do desempenho mecânico, acústico e térmico

3.5.2.1. Produção das placas

Foram confeccionadas placas de vedação vertical internas com 1,15 m x 0,85 m x 0,0125 m com os compósitos – produzidos no item 3.5.1 – que apresentaram viabilidade de

produção conforme explicado no item 4.4.1. As composições dos compósitos que foram produzidas estão apresentadas na TABELA 3.5-3.

Aglom.	Relação água/aglom.	Tipo de Madeira	Composição Granulométrica	Adi quí	tivo nico	Proporção	madeira/ag (em volume)	glomerante)
	(em massa)			AC	SUP	0,00	1,86	2,22
			REF	Х	Х	Х	-	-
Cimento	0.5	Compensado	CG01	Х	Х	-	Х	-
Portland	0,5	Eucalipto	CG01	Х	Х	-	Х	-
		Pínus	CG01	Х	Х	-	Х	-
			REF	-	Х	Х	-	-
Corre	0.7	Compensado	CG01	-	Х	-	-	Х
Gesso	0,7	Eucalipto	CG01	-	Х	-	-	Х
		Pínus	CG01	-	Х	-	-	Х

TABELA 3.5-3 – COMPOSIÇÕES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA PRODUZIDOS PARA O ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS COM 1,15 m x 0,85 m x 0,0125 m

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: As composições com proporção madeira/aglomerante de 0,00 representam as amostras de referência.

A partir da TABELA 3.5-3 é possível verificar que foram produzidos 08 traços nesta etapa do estudo. Como amostras de referência foram utilizadas placa de *drywall standart* (1,20 m x 1,80 m x 0,0125 m) e placa cimentícia (2,40 m x 1,20 m x 0,010 m) disponíveis no mercado.

Para a confecção das placas (FIGURA 3.5-7), os procedimentos de produção realizados foram os mesmos detalhados no item 3.2.1.4. Foram produzidas formas com gabaritos metálicos, utilizando lona plástica como fundo da forma em chapa de compensado.

Os procedimentos de dosagem realizados foram os mesmos detalhados no item 3.5.1.1, no entanto, de forma manual utilizando uma masseira de 250 litros, pá e enxada. Depois de produzido o compósito, o material foi lançado nas formas, espalhado com uma colher de pedreiro, e alisado para propiciar o acabamento adequado.

Após 48 \pm 24 horas, as placas foram desformadas e acondicionadas na horizontal em local seguro e ventilado.

b a d с e

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: [a] Formas com gabaritos metálicos com fundo em chapa de compensado; [b] Uso de lona plástica para favorecer a desforma; [c] Moldagem das placas produzidas com compósito cimento-madeira; [d] Placas produzidas com compósito gesso-madeira antes da desforma; [e] Placas desformadas e acondicionadas na horizontal em local seguro e ventilado.

3.5.2.2. Ensaios realizados

As placas produzidas com os compósitos de madeira foram avaliadas quanto ao desempenho mecânico, ao desempenho acústico e ao desempenho térmico. Na TABELA 3.5-4 estão listados os ensaios, suas respectivas normas, a idade e a quantidade de amostras.

116

Ensaios	Norma	Idade (dias)	Amostras (unid.)
Verificação da resistência a impactos de corpo duro	NBR 15575-4 Anexo B (ABNT, 2021) e NBR 11675 (ABNT, 2016)	28	1
Verificação da resistência a impactos de corpo mole	NBR 11675 (ABNT, 2016)	28	1
Determinação da resistência às solicitações de peças suspensas	NBR 15575-4 Anexo A (ABNT, 2021) e NBR 11678 (ABNT, 2016)	28	1
Determinação da dureza superficial	NBR 14715-2 (ABNT, 2021)	28	1
Desempenho acústico	ISO 10140-2 (ISO, 2021)	49	1
Desempenho térmico	Franzen (2015)	98	1

TABELA 3.5-4 – ENSAIOS DE DESEMPENHO REALIZADOS NAS PLACAS PRODUZIDAS COM OS COMPÓSITOS

FONTE: A autora (2023).

Foram produzidos 2 corpos de prova para cada traço – sendo 1 para a realização do ensaio de verificação da resistência a impacto de corpo duro, ensaio de verificação da resistência a impacto de corpo mole, ensaio de determinação da resistência às solicitações de peças suspensas, e ensaios de determinação de dureza superficial, e 1 para a realização do ensaio de desempenho acústico e do ensaio experimental de desempenho térmico.

Os ensaios de desempenho foram realizados no Laboratório de Vibrações e Ruídos (LVR) do Departamento de Mecânica da UFPR que possui três ambientes: a sala de apoio, a sala 01 e a sala 02 (FIGURA 3.5-8).

A sala 01 possui, aproximadamente, uma área de 44 m² e um volume de 106 m³, duas janelas basculante com vedação e porta de acesso com isolamento acústico. A sala 02 mede, aproximadamente, 9 m² e possui um poço de armazenamento e bombeamento de água localizado sob a sala que gera um ruído intermitente de gotas de água. Apesar disso, o nível de pressão sonora gerado pela fonte é superior ao ruído proveniente do gotejamento, tornando-o insignificante.

A parede que divide a sala de emissão e recepção possui uma abertura de 0,85 x 1,15 m² e neste vão foi instalado um quadro estrutural em aço leve para a fixação das placas para a realização dos ensaios.



FIGURA 3.5-8 – CONFIGURAÇÃO DO LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E RUÍDOS (LVR) DO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA DA UFPR

LEGENDA: [a] Planta baixa do Laboratório de Vibrações e Ruídos (LVR) com medidas em milímetros; [b] Quadro estrutural em aço leve; [c] Placa vedada com massa de calafetar.

O quadro estrutural de aço leve foi confeccionado com montantes posicionados na vertical – espaçados de modo a manter um vão de 0,60 m no centro – e guias posicionadas na base e topo. As ligações entre os perfis foram feitas com parafusos autoatarraxantes com revestimento anticorrosivo. As frestas existentes entre o quadro estrutural e a alvenaria foram

preenchidas com a aplicação de selante elastomérico monocomponente à base de poliuretano em todo o perímetro. A fixação das placas no quadro estrutural foi realizada com parafusos agulha em aço carbono, cada placa foi fixada com 04 parafusos. Para a realização dos ensaios acústico e térmico, as placas ensaiadas foram vedadas, ainda, com massa de calafetar (borracha butílica).

Para a verificação da resistência a impacto de corpo duro (FIGURA 3.5-9) foi utilizada uma esfera de aço – com 50 mm e massa de $5\pm0,05$ N – num sistema pendular instalado na sala 01 e um paquímetro de profundidade com resolução de 0,1 mm. Foram aplicados impactos aleatoriamente na face do corpo de prova posicionando o centro de massa da esfera a cota de 50 cm da base do corpo de prova. Foram produzidos dez impactos de 2,5 J e, após os impactos foi realizada a inspeção visual (verificando a ocorrência de rupturas, transpassamentos, estilhaçamentos e deteriorações).

FIGURA 3.5-9 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO A IMPACTOS DE CORPO



FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Aparato utilizado; [b] Amostra fixada; [c] Ensaio em andamento na sala 01.

Para a verificação da resistência a impacto de corpo mole (FIGURA 3.5-10) foi utilizado um saco cilíndrico de couro – com diâmetro de 350 mm e altura de 900 mm contendo em seu interior areia e serragem com massa de 400 ± 4 N – num sistema pendular instalado na sala 01, um dispositivo para registro gráfico dos deslocamentos transversais instalado na placa a partir da sala 02 e um paquímetro de profundidade com resolução de 0,1 mm. Foi aplicado um impacto de 60J no centro do corpo de prova, em seguida, foram realizados três impactos sucessivos de 120 J no centro do corpo de prova. Após os impactos, foi realizada a inspeção visual dos corpos de prova determinando o deslocamento transversal instantâneo e residual (deslocamento após 5 min da realização do impacto).

FIGURA 3.5-10 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO A IMPACTOS DE CORPO MOLE



FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Aparato utilizado; [b] Amostra fixada e dispositivo para registro gráfico dos deslocamentos transversais instalado na placa a partir da sala 02; [c] Ensaio em andamento na sala 01.

Para a determinação da resistência às solicitações de peças suspensas (FIGURA 3.5-11) foram utilizados pesos de 50 N cada, régua graduada e paquímetro com resolução de 1,0 mm, e mãos-francesas para aplicação do carregamento (conforme detalhada na NBR 11678 (ABNT, 2016)) instaladas na placa a partir da sala 01. Foram aplicadas as cargas e realizada a inspeção visual da placa e do dispositivo de fixação.

FIGURA 3.5-11 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA ÀS SOLICITAÇÕES DE PEÇAS SUSPENSAS



FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Aparato utilizado; [b] Amostra fixada; [c] Ensaio em andamento.

Para o ensaio de desempenho acústico foi utilizada (FIGURA 3.5-12) uma mesa de som com amplificador sonoro – com potência 1200W RMS, resposta de frequência de 5Hz a 20 kHz, e fonte de energia –, uma fonte sonora dodecaédrica – com 12 alto-falantes JBL MULTI SYSTEM 6TR6A medindo 6 1/2" (emissora do ruído rosa) –, um módulo de aquisição de dados LMS *Simcenter* SCADAS Tipo SCM01, dois dois microfones – tipo condensador prépolarizado de campo livre de 1/2" com sensibilidade típica de 50 mV/Pa (+/-1,5 dB), 3,15 Hz

a 20 kHz (+/-2 dB) –, dois pré-amplificadores de microfone, um computador contendo o *software* SIMCENTER TestLab (para a geração, aquisição e processamento de sinais e dados).



FIGURA 3.5-12 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO ACÚSTICO

LEGENDA: [a] Fonte sonora dodecaédrica; [b] Microfone; [c] Pré-amplificador de microfone; [d] Módulo de aquisição de dados LMS Simcenter SCADAS Tipo SCM01.

Para a realização do ensaio de desempenho acústico, a sala 01 foi denominada sala de recepção e a sala 02 foi denominada sala de emissão. Isto porque, na sala 02 estavam contidos um microfone e a fonte sonora, enquanto na sala 01 estava contido apenas um microfone. Foram realizadas seis leituras para cada amostra.

Cada leitura contou com uma configuração diferente dos equipamentos conforme apresentado na TABELA 3.5-5, FIGURA 3.5-13 e FIGURA 3.5-14.

			ACUSTI	CO		
	Fonte So	onora (FS)	Microfone E	missor (ME)	Microfone F	Receptor (MR)
Leitura	Posição	Altura do piso (mm)	Posição	Altura do piso (mm)	Posição	Altura do piso (mm)
1	FS1	-	ME1	1.300	MR1	1.400
2	FS1	-	ME1	1.300	MR3	1.300
3	FS1	-	ME1	1.300	MR5	1.200
4	FS2	-	ME2	1.300	MR2	1.200
5	FS2	-	ME2	1.300	MR4	1.400
6	FS2	-	ME2	1.300	MR6	1.300

TABELA 3.5-5 – CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO ACÚSTICO



FIGURA 3.5-13 – CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO ACÚSTICO

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: MR – Microfone na sala de recepção (posições 1 a 6); ME – Microfone na sala de emissão (posições 1 e 2); FS – Fonte sonora na sala de emissão (posições 1 e 2).



FIGURA 3.5-14 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO ACÚSTICO



FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Sala emissora; [b] Sala receptora.

O ensaio de desempenho acústico foi realizado de acordo com a ISO 10140-2 (ISO, 2021) que detalha o procedimento para a determinação do isolamento de som aéreo realizado em laboratório, permitindo estipular o índice de redução sonora (R) (*sound reduction index*) ou a perda de transmissão sonora (*sound transmission loss* – TL), conforme apresentado nas equações (14) e (15).

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \tag{14}$$

Em que *R* é o índice de redução sonora (dB), L_1 é a média energética dos níveis de pressão sonora na sala de emissão (dB), L_2 é a média energética dos níveis de pressão sonora na sala de recepção (dB), *S* é a área da abertura na qual a amostra é instalada (m²), *A* é a área de absorção equivalente da sala de recepção (m²).

$$A = \frac{0.16 \, x \, V}{T} \tag{15}$$

Em que A é a área de absorção equivalente da sala de recepção (m²), V é o volume da sala de recepção (m³), T é o tempo de reverberação na sala de recepção (s). Para cada amostra foi obtido o índice de redução sonora (R) numa faixa de frequência que variou de 100 a 8000 Hz.

A NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021) especifica que o índice de redução sonora ponderado (R_w) equivale ao índice de redução sonora (R) e deve ser calculado conforme especificado na ISO 10140-2 (ISO, 2021) (equações (14) e (15)).

Para o ensaio de desempenho térmico (FIGURA 3.5-15 e FIGURA 3.5-16) foi utilizada uma fonte de calor – com 12 lâmpadas de 250 watts totalizando 1.449 watts/m² –, uma câmera Termovisor Flir E40 – que reproduz imagens infravermelhas com 160 x 120 pixels (19.200), campo de visão de 25° x 19°, distância focal mínima de 0,4 m, sensibilidade térmica

de 0,07°C (70 mK) com faixa de medição da temperatura de -20°C à 650°C e precisão de temperatura de ± 2 °C ou ± 2 % da leitura – e um termohigrômetro digital.

Foram inseridos, na câmera térmica, dados de entrada referente a emissividade do material de 0,90, a distância entre a câmera e a amostra de 2,0 m, a umidade ambiente – que nas datas de ensaio variou de 68% a 79% – e a temperatura atmosférica – que nas datas de ensaio variou de 15°C a 18°C.

ล b 29.1 oC **\$FLIR** с 0~ 46.7 27.1 79% Hum. rel. 03/06/23 Temp. atm 18 10:32

FIGURA 3.5-15 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO TÉRMICO EXPERIMENTAL

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Posicionamento do painel térmico e termohigrômetro; [b] Ensaio em andamento na sala emissora; [c] Imagem obtida pela câmera térmica na sala receptora.



FIGURA 3.5-16 – CONFIGURAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DO ENSAIO TÉRMICO EXPERIMENTAL

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: PT – Painel térmico na sala de emissão; CT – Câmera térmica na sala de recepção.

A partir das NBR 15575-4 (ABNT, 2021) e NBR 15220-2 (ABNT, 2023) é possível obter o desempenho térmico de forma quantitativa, entretanto, devem ser conhecidas a condutividade térmica e a resistência térmica dos materiais. Como os resíduos de construção e demolição (RCD) e os compósitos desenvolvidos não possuem as informações e os índices necessários para os cálculos, neste estudo, foi determinado o desempenho térmico de forma qualitativa seguindo um procedimento experimental (FRANZEN, 2015) para a realização do ensaio.

O procedimento experimental consistiu em aquecer uma das faces da placa (sala de emissão) até que o termostato preso a esta registrasse a temperatura de 80°C. O termostato manteve a fonte de calor oscilando entre 75°C e 85°C durante 100 min (para as placas produzidas com cimento) e durante 60 min (para as placas produzidas com gesso) enquanto as fotos foram registradas a cada 10 min no centro do painel (a partir da sala de recepção) (FIGURA 3.5-15c). Para cada amostra foram avaliadas a temperatura mínima, a máxima, a média e a do ponto central da placa obtida a partir das imagens para cada tempo.

É importante destacar que não foi possível realizar a avaliação do desempenho (conforme descrito no item 3.5.2) nas placas produzidas sem partículas de madeira recicladas pois estas apresentaram trincas e fissuras significativas que inviabilizaram a realização do ensaio (FIGURA 3.5-17). Desta maneira, como amostras de referência, foram consideradas somente a placa de *drywall standart* e a placa cimentícia adquiridas no comércio local.



FIGURA 3.5-17 – PLACAS COM AVARIAS PRODUZIDAS SEM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Placa de cimento; [b] Placa de gesso.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS EM COMPÓSITOS

4.1.1 Análise comparativa das composições granulométricas das partículas de madeira recicladas

Na FIGURA 3.1-10, apresentada no item 3.1.3.2, podem ser observadas as composições granulométricas das partículas de madeira recicladas sendo possível constatar que a repetição do procedimento de moagem foi eficaz em contribuir para o aumento da quantidade de partículas finas de eucalipto e pínus. Entretanto, para as partículas de compensado, o mesmo efeito não foi verificado. Isto pode estar relacionado ao fato de que os painéis de compensado são produzidos a partir da laminação cruzada de camadas finas de madeira que são ligadas umas às outras utilizando resinas fenólicas (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Neste estudo, as composições que contém a maior quantidade de partículas com menores dimensões são as de eucalipto, seguida do pínus e, por fim, de compensado. É importante destacar que as dimensões das partículas de madeira recicladas podem influenciar o desempenho no estado fresco e no estado endurecido dos compósitos, pois quanto menor o tamanho das partículas, menor tende a ser a compatibilidade entre o cimento e a madeira (KARADE; IRLE; MAHER, 2006). Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto menor a partícula, maior a área superficial e, consequentemente, maior a quantidade de extrativos liberados na composição, provocando alterações na hidratação do cimento, por exemplo. A partir da TABELA 3.1-10 e da TABELA 3.1-11, é possível observar que dentre as partículas analisadas, as partículas de pínus apresentaram maior área superficial – conforme a diminuição da granulometria – e maior teor de extrativos totais.

Na FIGURA 3.1-11, apresentada no item 3.1.3.2, os resultados de massa unitária seca indicam que, para dosagens realizadas em massa, ocorre uma diminuição no volume de madeira presente nos traços produzidos com a composição granulométrica CG03 quando comparada às composições granulométricas CG01 e CGP1,2. Isto porque, a massa unitária da composição granulométricas CG03 é superior comparada às composições granulométricas CG01 e CGP1,2 independentemente do tipo de madeira utilizada. De modo geral, ao comparar os três diferentes

tipos de madeira, as partículas de compensado (0,148 g/cm³, em média) apresentaram maior valor de massa unitária seca, seguido pelas partículas de eucalipto (0,144 g/cm³, em média) e de pínus (0,135 g/cm³, em média). Isto significa que compósitos produzidos com compensado tendem a apresentar um menor volume de partículas quando dosados em massa. É importante destacar que a quantidade de partículas de madeira recicladas presente nos compósitos é capaz de influenciar no seu desempenho mecânico (TURGUT, 2007; MORALES-CONDE *et al.*, 2016).

4.1.2 Análise da influência das composições granulométricas das partículas no estado fresco

Na FIGURA 4.1-1 estão apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio de tempo de início e de fim de pega dos compósitos de cimento-madeira. Os compósitos produzidos com partículas de compensado apresentaram os menores valores, seguido dos compósitos produzidos com eucalipto e pínus. Desta maneira, é possível observar que existe uma tendência de aumento do tempo de início e fim de pega com relação aos diferentes tipos de madeira utilizados.



FIGURA 4.1-1 – RESULTADO DOS TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PEGA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

Ao considerar os três diferentes tipos de madeira, verifica-se que tanto para as partículas de compensado como para as de eucalipto, os maiores tempos de início e fim de pega foram obtidos para as composições granulométricas CG03. Pesquisadores indicam que cada espécie de madeira possui diferentes tipos e quantidades de extrativos de madeira, provocando

diferentes efeitos sobre a hidratação do cimento (NA *et al.*, 2014), ou seja, para estas amostras, a presença de partículas com menores dimensões – representadas neste estudo pelas composições contendo as composições granulométricas CGP1,2 – não apresentou influência.

Diferente disso, para os compósitos de cimento-madeira produzidos com partículas de pínus, é possível observar o efeito significativo da presença das partículas menores. Comparando os tempos de início e fim de pega entre as composições granulométricas CG01 e CGP1,2, é possível observar um aumento de 200% e 100%, respectivamente, ou seja, quanto menor a partícula, maior é a área superficial e, consequentemente, maior é a quantidade de extrativos livres na mistura (KARADE; IRLE; MAHER, 2006). O mesmo efeito foi observado neste estudo, conforme apresentado na TABELA 3.1-11, o teor de extrativos totais obtido para as partículas de compensado, eucalipto e pinus foi, respectivamente, 3,25%, 2,06% e 6,15%. Ou seja, as partículas de pinus – que obtiveram a maior área superficial (TABELA 3.1-10) – apresentaram teor de extrativos totais, aproximadamente, 190% e 300% superior às partículas de compensado e eucalipto, respectivamente. Além disso, quanto ao pH, as partículas de pínus apresentaram o menor valor de pH (6,12) – conforme apresentado na TABELA 3.1-11 – dentre os tipos de madeira avaliados.

É importante destacar que, ao verificar os resultados das amostras de referência, o aditivo acelerador de pega utilizado mostrou-se eficiente para diminuir o tempo de início de pega dos compósitos produzidos com partículas de madeira recicladas. Diferente do observado para o tempo de fim de pega quando comparadas as amostras de referência com os compósitos contendo partículas de madeira recicladas.

Na FIGURA 4.1-2 estão apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio de tempo de início e de fim de pega dos compósitos de gesso-madeira. Diferente do observado para os compósitos de cimento-madeira, os compósitos de gesso-madeira não indicam sofrer influência dos diferentes tipos de madeira utilizados.

Entretanto, com relação à composição granulométrica das partículas (CG01, CG03 e CGP1,2), é possível observar que tanto o tempo de início de pega como o tempo de fim de pega foram menores para as composições produzidas com as composições granulométricas CGP1,2. Por isso, acredita-se que esse efeito é provocado por um fenômeno físico. Isto porque, uma maior fração de partículas com menores dimensões tende a aumentar a área superficial provocando maior absorção de água pela madeira (MORALES-CONDE *et al.*, 2016), reduzindo a quantidade de água disponível na mistura e contribuindo para a aceleração da pega do gesso.





Na FIGURA 4.1-3 estão apresentados os resultados de determinação do índice de consistência dos compósitos cimentícios. É importante destacar que o maior índice de consistência foi obtido para as amostras de referência, indicando que a presença das partículas de madeira recicladas é capaz de contribuir para a diminuição deste parâmetro corroborando com os resultados obtidos por Savastano *et al.* (1999) e Onuaguluchi e Banthia (2016).

FIGURA 4.1-3 – RESULTADO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA



Além disso, para as partículas de compensado e eucalipto, as composições granulométricas CG01 e CG03 pouco diferiram, sendo que a maior influência pode ser

observada para as composições granulométricas CGP1,2 que contribuíram para a diminuição do índice de consistência e, consequentemente, para a perda de trabalhabilidade do compósito.

Entretanto, para os compósitos produzidos com as partículas de pínus, os resultados indicam que a diminuição das dimensões das partículas de madeira recicladas contribuiu para o aumento do índice de consistência. Isto pode ter ocorrido pelo fato de que ao produzir compósitos com as partículas com menor dimensão, a massa unitária destas foi maior, proporcionando um menor volume de madeira na mistura e, consequentemente, menor absorção de água conforme explicado por Li, Wang e Wang (2006), Andiç-Çakir *et al.* (2014) e Çomak, Bideci e Bideci (2018). Além disto, o menor tamanho das partículas pode ter propiciado menor atrito entre elas, uma vez que as partículas de madeira recicladas de maior dimensão tendem a apresentar um formato mais lamelar.

Os resultados de densidade de massa fresca (FIGURA 4.1-4 e FIGURA 4.1-5) dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira indicam que a composição granulométrica das partículas de madeira recicladas exerce pouca influência neste parâmetro, visto que, os compósitos apresentaram valores entre 1,65 e 1,70 g/cm³ e 1,49 e 1,54 g/cm³, respectivamente.



FIGURA 4.1-4 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

FONTE: A autora (2023).



FIGURA 4.1-5 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA

Turgut (2007) e Morales-Conde *et al.* (2016) afirmam que a proporção de madeira na composição e a densidade dessas partículas são consideradas pequenas quando comparadas à proporção e à massa específica do aglomerante utilizado.

Observou-se, ainda, que a maior densidade de massa fresca foi obtida para as amostras de referência, indicando que a presença de partículas de madeira recicladas contribui para a diminuição da densidade dos compósitos corroborando com os resultados obtidos por Al Rim *et al.* (1999), Andiç-Çakir *et al.* (2014) e Xie *et al.* (2015).

4.1.3 Análise da influência das composições granulométricas das partículas no estado endurecido

Os resultados de densidade de massa endurecida aos 28 dias dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira (FIGURA 4.1-6 e FIGURA 4.1-7) evidenciam que os maiores valores foram obtidos para amostras que continham as composições granulométricas CG03, tendo em vista que estas partículas, independentemente do tipo de madeira – seja de compensado, de eucalipto ou de pínus – apresentaram os maiores valores de massa unitária seca. Ao realizar a dosagem dos materiais em massa, as partículas com menor massa unitária passam a apresentar menor volume na mistura, contribuindo para o aumento da densidade (TURGUT, 2007; MORALES-CONDE *et al.*, 2016).

O mesmo ocorre com as composições granulométricas CGP1,2 cujos valores de massa unitária foram os menores obtidos dentre as composições granulométricas avaliadas das partículas e, consequentemente, apresentaram os menores valores de densidade de massa endurecida, visto que, devido à maior proporção de partículas de madeira recicladas, menor tende a ser a densidade da composição (TURGUT, 2007; MORALES-CONDE *et al.*, 2016).



FIGURA 4.1-6 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA



FIGURA 4.1-7 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA



LEGENDA: Os valores em porcentagem representam as proporções aglomerante/madeira (em massa).

A análise estatística indicou, ainda, que existe diferença estatística entre os compósitos ao considerar os três fatores avaliados – a composição granulométrica (CG01, CG03 e CGP1,2), o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pínus) e a proporção de madeira na composição (7,5% - 11% - 15%), ou seja, são capazes de influenciar a densidade de massa endurecida dos compósitos. Considerando os compósitos de gesso-madeira, a análise fatorial indicou equivalência estatística ao considerar como fatores principais o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pínus) e a proporção de madeira na composição (7,5% - 11% - 15%), ou seja, ao considerar como fator o tipo de madeira, foi obtida equivalência estatística os compósitos produzidos com compensado e pínus. Porém, ao considerar como fator a proporção de madeira na composição (7,5% - 11% - 15%), foi obtida equivalência estatística entre os teores 11% e 15%.

De modo geral, verificou-se que os compósitos de cimento-madeira produzidos com a composição granulométrica CGP1,2, ou com pínus, ou com a proporção 15% tendem a apresentar os menores valores de densidade de massa endurecida. Enquanto, para os compósitos de gesso-madeira, as misturas produzidas com a composição granulométrica CGP1,2, ou com compensado ou pínus, ou com as proporções 11% ou 15% tendem a apresentar os menores valores de densidade de massa endurecida. Por fim, observou-se que as densidades de massa endurecida dos compósitos contendo partículas de madeira recicladas foram significativamente inferiores aos resultados obtidos para as amostras de referência.

Na FIGURA 4.1-8 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias dos compósitos de cimento-madeira. É possível observar diferentes comportamentos de acordo com o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pínus) presente na composição.

FIGURA 4.1-8 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA



LEGENDA: Os valores em porcentagem representam as proporções aglomerante/madeira (em massa).

Verificou-se que as menores resistências foram obtidas para os compósitos contendo a composição granulométrica CG03, quando produzidos com as partículas de compensado, devido ao menor volume de partículas na mistura – conforme discutido anteriormente. Enquanto para os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto, os resultados apresentaram-se muito próximos, indicando pouca influência da composição granulométrica das partículas e da proporção de madeira na composição.

Diferente destes, os compósitos cimentícios produzidos com as partículas de pínus apresentaram diminuição da resistência de acordo com a diminuição da dimensão das partículas, observada a partir de sua composição granulométrica. A partir da TABELA 3.1-10 e da TABELA 3.1-11, é possível observar que dentre as partículas analisadas, as partículas de pínus apresentaram maior área superficial – conforme a diminuição da granulometria, maior teor de extrativos totais e o menor valor para o pH (6,12). A liberação de extrativos pelas partículas de madeira recicladas contribuem para uma maior incompatibilidade entre o cimento Portland e a espécie em questão – conforme observado no estado fresco através do ensaio de tempo de pega – resultando na diminuição da resistência. Pesquisadores (ONUAGULUCHI, BANTHIA, 2016) explicam que a influência das fibras naturais no desempenho mecânico dos compósitos, ainda é um limitante para a propagação do seu uso.

A análise estatística indica, ainda, que ao considerar como fator as composições granulométricas das partículas, foi obtida equivalência estatística dos compósitos produzidos com as composições granulométricas CG03 e CGP1,2, ou seja, para estes compósitos os resultados de resistência à tração na flexão podem ser considerados iguais entre si. Ao considerar como fator a proporção de madeira na composição (7,5% - 11% - 15%), foi obtida equivalência estatística entre os teores 7,5% e 15%. Foi observada diferença estatística ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pínus), visto que as partículas de eucalipto tendem a apresentar melhor dispersão e melhor ligação com a matriz cimentícia quando comparadas às partículas de pínus, contribuindo para uma melhoria do desempenho mecânico (TONOLI *et al.*, 2010b).

Dessa maneira, os compósitos produzidos com a composição granulométrica CG03, ou com as partículas de compensado, ou com a proporção de 11% tendem a apresentar maior resistência à tração na flexão. Vale destacar, ainda, que os compósitos de cimento-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto nas composições granulométricas CG01 e CGP1,2 apresentaram resultados de resistência à tração na flexão iguais ou superiores às amostras de referência. Na FIGURA 4.1-9 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias dos compósitos de gesso-madeira. Observa-se que as menores resistências são obtidas para os compósitos produzidos com as partículas de madeira recicladas que contém a maior quantidade de partículas menores. É importante destacar que compósitos contendo fibras geralmente são macios e dúcteis em torno das fibras – que são geralmente mais fortes – mas podem ser frágeis em relação à matriz (SMITH, 1994).

FIGURA 4.1-9 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA



LEGENDA: Os valores em porcentagem representam as proporções aglomerante/madeira (em massa).

A análise estatística indica, ainda, que ao considerar como fator a proporção de madeira na composição (7,5% - 11% - 15%), foi obtida equivalência estatística entre os teores 7,5% e 15%. Para os outros dois fatores avaliados (a composição granulométrica – CG01, CG03 e CGP1,2, e o tipo de madeira – compensado, eucalipto e pínus) foi verificada diferença estatística.

Desta maneira, os compósitos produzidos com a composição granulométrica CG01, ou com as partículas de eucalipto, ou com as proporções de 7,5% ou 15% tendem a apresentar maior resistência à tração na flexão.

Vale destacar, ainda, que os compósitos de gesso-madeira produzidos com as partículas de eucalipto na composição granulométrica CG01 apresentou resultado de resistência à tração na flexão superior à amostra de referência.

É importante destacar que a discrepância dos resultados dos compósitos produzidos, conforme explicado por Pedreño-Rojas *et al.* (2017) também pode estar relacionada à dispersão

não uniforme das partículas de madeira recicladas, podendo influenciar o desempenho dos corpos de prova, principalmente quando submetidos ao esforço de tração na flexão.

Na FIGURA 4.1-10 estão apresentados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos compósitos de cimento-madeira. É possível observar diferentes comportamentos de acordo com o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pínus), como descrito para os resultados de resistência à tração na flexão.

FIGURA 4.1-10 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA



LEGENDA: Os valores em porcentagem representam as proporções aglomerante/madeira (em massa).

Verificou-se que as menores resistências foram obtidas para os compósitos contendo as composições granulométricas CG03, quando produzidos com as partículas de compensado, devido ao menor volume de partículas na mistura (conforme discutido anteriormente). Já para os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto, os resultados indicaram pouca influência das composições granulométricas das partículas e da proporção de madeira na composição. Diferente destes, os compósitos de cimento produzidos com as partículas de pínus apresentaram diminuição da resistência de acordo com a diminuição da dimensão das partículas (AL RIM *et al.*, 1999; TURGUT, 2007), conforme explicado anteriormente.

A análise estatística indica, ainda, que para os fatores avaliados (composição granulométrica das partículas, tipo e proporção de madeira) foi observada diferença estatística. De modo geral, verificou-se que os compósitos de cimento-madeira produzidos com a composição granulométrica CGP1,2, ou com compensado, ou com a proporção 7,5% tendem a apresentar os maiores valores de resistência à compressão.

Na FIGURA 4.1-11 estão apresentados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos compósitos de gesso-madeira. É possível observar a influência da proporção de madeira na composição. Conforme explicado por Morales-Conde *et al.* (2016), para maiores quantidades de madeira, menor tende a ser a resistência à compressão. Além disso, devido à diferença dos valores de massa unitária entre as composições granulométricas CG01, CG03 e CGP1,2, observa-se que os compósitos produzidos com as composições granulométricas CG01, 2 apresentam as menores resistências à compressão.

FIGURA 4.1-11 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA



LEGENDA: Os valores em porcentagem representam as proporções aglomerante/madeira (em massa).

A análise estatística indica, ainda, que ao considerar como fator a composição granulométrica da partícula (P1, P3 e P1,2), foi obtida equivalência estatística entre as composições granulométricas CG01 e CGP1,2, ou seja, indicando igualdade entre estes compósitos. E, também, para o fator de proporção da madeira (7,5% - 11% - 15%), foi observada equivalência entre as proporções 11% e 15%. Para o terceiro fator avaliado (tipo de madeira – compensado, eucalipto e pínus), foi obtida diferença estatística.

De modo geral, os compósitos produzidos apresentaram resistência à compressão superior a 2 MPa, indicando que o contato mecânico entre a matriz de gesso e as partículas de madeira recicladas foi satisfatório. Além disso, verificou-se que os compósitos de gessomadeira produzidos com as composições granulométricas CG01 ou CGP1,2, ou com eucalipto, ou com a proporção 7,5% tendem a apresentar os maiores valores de resistência à compressão. Por fim, observou-se que as resistências à compressão dos compósitos contendo partículas de madeira recicladas, independente do aglomerante utilizado, foram significativamente inferiores aos resultados obtidos com as amostras de referência.

Na FIGURA 4.1-12 estão apresentadas as correlações entre a massa unitária seca das partículas de madeira recicladas com a densidade de massa endurecida, a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão dos compósitos de cimento-madeira.

FIGURA 4.1-12 – CORRELAÇÃO ENTRE A MASSA UNITÁRIA SECA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS COM A DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA



LEGENDA: Símbolos quadrados representam os compósitos de compensado, círculos de eucalipto e triângulos de pinus.

Quanto à correlação da massa unitária seca com a densidade de massa endurecida (FIGURA 4.1-12), para os três tipos de madeira, observa-se que existe uma tendência de aumento da densidade com o aumento da massa unitária das partículas.

Na FIGURA 4.1-13 estão apresentadas as correlações entre a massa unitária seca das partículas de madeira recicladas com a densidade de massa endurecida, a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão dos compósitos de gesso-madeira.



LEGENDA: Símbolos quadrados representam os compósitos de compensado, círculos de eucalipto e triângulos de pinus.

Quanto à correlação da massa unitária seca com a densidade de massa endurecida (FIGURA 4.1-13a), para os três tipos de madeira, assim como nos compósitos cimentícios, observa-se que existe uma tendência de aumento da densidade com o aumento da massa unitária das partículas. Por outro lado, quanto à correlação da massa unitária seca com a resistência à tração na flexão e à compressão (FIGURA 4.1-13b e FIGURA 4.1-13c), não é possível observar uma tendência que explique o comportamento dos compósitos.

É importante ressaltar que, os valores de densidade de massa endurecida, resistência à tração na flexão e à compressão, utilizados para as correlações apresentadas nas FIGURA 4.1-12 e FIGURA 4.1-13 são os valores médios dos compósitos produzidos com diferentes proporções de madeira.

4.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

4.2.1 Análise da influência do aditivo superplastificante no estado fresco

Na FIGURA 4.2-1 estão apresentados os resultados de determinação do índice de consistência dos compósitos cimentícios. É importante destacar que os maiores índices de consistência foram obtidos para as amostras de referência e as amostras com proporção madeira/aglomerante 1,0 (em volume), independentemente do tipo de madeira. Essas amostras

foram consideradas autoadensáveis (com diâmetro superior à 450 mm) pois superaram o diâmetro da mesa de consistência.



FIGURA 4.2-1 – RESULTADO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE

Quanto à proporção madeira/aglomerante (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0), observou-se que, para os três tipos de madeira utilizados, a proporção 2,0 apresentou índice de consistência inferior ao mínimo necessário (TABELA 3.3-1) para a produção das placas de vedação. Isto porque, os compósitos cimentícios produzidos com proporção madeira/aglomerante 2,0 contendo as partículas de compensado, eucalipto e pínus apresentaram índice de consistência de 247 mm, 240 mm e 283 mm, respectivamente. Por outro lado, é indicado que o índice de consistência seja de, no mínimo, 305 mm. Esse resultado sugere que compósitos produzidos com esta proporção madeira/aglomerante apresentam maior dificuldade para a produção de placas.

Na TABELA 4.2-1 estão apresentadas as imagens referentes ao comparativo do índice de consistência dos compósitos cimento-madeira produzidos com superplastificante. Observase visualmente que, à medida em que a proporção de madeira aumenta, ocorre a diminuição do índice de consistência do compósito produzido. É possível verificar, também, que para as composições produzidas com as partículas de eucalipto, existe uma tendência em que ocorra a segregação das partículas de madeira recicladas. Observa-se a heterogeneidade da composição caracterizada pelas partículas de eucalipto e pela pasta cimentícia.

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha representa o índice de consistência mínimo de 305 mm.

TABELA 4.2-1 – COMP/	ARATIVO DO ÍNDICE DE CONS	BISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS CIN	AENTO-MADEIRA PRODUZIDOS	S COM SUPERPLASTIFICANTE
Tipo de madeira		Proporção madeira/agi	omerante (em volume)	
	0,0	1,0	1,5	2,0
Compensado				
Eucalipto				
Pinus				
		FONTE: A autora (2023).		

142

Pesquisadores (DIAS *et al.*, 2022) explicam que o índice de consistência é influenciado pelo teor de incorporação de resíduos de madeira. Isto porque, foi observada uma diminuição da consistência com o aumento da incorporação de madeira na mistura. Este comportamento pode estar relacionado à organização das fibras na matriz cimentícia. Comportamento similar (INCE *et al.*, 2021) foi verificado também ao substituir o cimento Portland por serragem de madeira (em até 5% com relação à massa do aglomerante).

Na FIGURA 4.2-2 estão apresentados os resultados de determinação do índice de consistência dos compósitos produzidos com gesso. É importante destacar que, assim como nos compósitos cimentícios, os maiores índices de consistência foram obtidos para as amostras de referência e as amostras com proporção madeira/aglomerante 1,0 (em volume), independentemente do tipo de madeira. Essas amostras foram consideradas autoadensáveis (com diâmetro superior à 450 mm) pois superaram o diâmetro da mesa de consistência.

FIGURA 4.2-2 – RESULTADO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha representa o índice de consistência mínimo de 310 mm.

Quanto à proporção madeira/aglomerante (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5), observou-se que, para os três tipos de madeira utilizados, a proporção 2,5 apresentou índice de consistência inferior ao mínimo necessário (TABELA 3.3-1) para a produção das placas de vedação. Isto porque, os compósitos produzidos com proporção madeira/aglomerante 2,5 contendo as partículas de compensado, eucalipto e pínus apresentaram índice de consistência de 160 mm,
153 mm e 253 mm, respectivamente. Por outro lado, é indicado que o índice de consistência seja de, no mínimo, 310 mm. Esse resultado sugere que compósitos produzidos com esta proporção madeira/aglomerante apresentam maior dificuldade para a produção de placas.

Vale destacar que os compósitos produzidos com proporção madeira/aglomerante 2,0 contendo as partículas de compensado, eucalipto e pínus apresentaram índice de consistência de 303 mm, 210 mm e 343 mm, respectivamente.

A adição de fibras de *Pinus sylvestris* em compósitos produzidos com gesso também contribuiu para a diminuição da trabalhabilidade, dificultando seu processo de mistura (KUQO, MAI, 2021). Esses pesquisadores (KUQO, MAI, 2021) sugerem que o volume de água necessário para manter a trabalhabilidade dos compósitos, foi proporcional à quantidade de fibras adicionadas, numa relação exponencial e não linear.

Outros pesquisadores (JIA *et al.*, 2021) explicam, ainda, que a perda de trabalhabilidade em compósitos produzidos com gesso e fibras de madeira pode estar relacionada à distribuição heterogênea das fibras. Além disso, características como a dosagem das fibras nos compósitos, o tamanho das fibras e sua natureza microscópica também tendem a apresentar um efeito negativo quanto à trabalhabilidade. Ou seja, de acordo com Jia *et al.* (2021), quanto maior a dosagem de fibra na composição e quanto menor o tamanho da fibra, menor tende a ser a distribuição das fibras na composição e maior tende a ser a absorção de água e da pasta de gesso na superfície das fibras, contribuindo para a diminuição da trabalhabilidade. Desta maneira, a quantidade de fibras utilizadas numa matriz de gesso tende a ser limitada pela trabalhabilidade, entretanto, este efeito pode ser minimizado com a utilização de aditivos químicos, por exemplo (JIA *et al.*, 2021).

Na TABELA 4.2-2 estão apresentadas as imagens referentes ao comparativo do índice de consistência dos compósitos gesso-madeira produzidos com superplastificante. Observa-se visualmente que, assim como nos compósitos cimentícios, à medida em que a proporção de madeira aumenta, ocorre a diminuição do índice de consistência do compósito produzido.

É possível verificar, também, que para as composições produzidas com as partículas de eucalipto, existe uma tendência em que ocorra a segregação das partículas de madeira recicladas. Observa-se a heterogeneidade da composição caracterizada pelas partículas de eucalipto e pela pasta de gesso.

Os resultados de densidade de massa fresca (FIGURA 4.2-3 e FIGURA 4.2-4) dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira produzidos com aditivo superplastificante apresentaram valores entre 1,46 e 1,60 g/cm³, e 1,34 e 1,52 g/cm³, respectivamente.



FIGURA 4.2-3 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

FIGURA 4.2-4 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA FRESCA DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

Observou-se, novamente, que a maior densidade de massa fresca foi obtida para as amostras de referência, indicando que a presença de partículas de madeira recicladas contribui para a diminuição da densidade dos compósitos corroborando com os resultados obtidos por Al Rim *et al.* (1999), Andiç-Çakir *et al.* (2014) e Xie *et al.* (2015).

4.2.2 Análise da influência do aditivo superplastificante no estado endurecido

Nas FIGURA 4.2-5 e FIGURA 4.2-6 estão apresentados os resultados de densidade de massa endurecida aos 28 dias dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira produzidos com superplastificante. De modo geral, os resultados demonstram que quanto menor a proporção madeira/aglomerante, maior tende a ser a densidade de massa endurecida do compósito.

É importante destacar que as diferentes condições – *in natura* e seca – realizadas com as amostras dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira, para a determinação da densidade de massa endurecida, pouco influenciaram nos resultados obtidos.

Considerando os compósitos de cimento-madeira, a análise estatística indicou, que não existe diferença estatística entre os compósitos ao considerar a condição da amostra (*in natura* e seca) e o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pínus). Entretanto, quanto à proporção madeira/aglomerante (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0) a análise estatística indicou, que existe diferença estatística entre os compósitos avaliados. Ou seja, a proporção madeira/aglomerante é capaz de influenciar a densidade de massa endurecida dos compósitos.

Isto porque, a maior densidade de massa endurecida foi obtida para a composição produzida com a proporção madeira/aglomerante 0,0 (1.651,60 kg/m³) (amostra de referência), seguida pelas composições produzidas com as proporções madeira/aglomerante 1,0 (1.275,62 kg/m³) e 1,5 (1.269,65 kg/m³) – que apresentaram equivalência estatística entre si – e, por fim, pela composição produzida com a proporção madeira/aglomerante 2,0 (1.188,28 kg/m³). A análise estatística indicou, portanto, que a composição produzida com a proporção madeira/aglomerante 2,0 tende a apresentar a menor densidade de massa endurecida quando comparada com as demais.



FIGURA 4.2-5 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

FIGURA 4.2-6 – RESULTADO DA DENSIDADE DE MASSA ENDURECIDA DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

Considerando os compósitos de gesso-madeira, a análise estatística indicou, que não existe diferença estatística entre os compósitos ao considerar a condição da amostra (*in natura* e seca) e o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pínus). Entretanto, quanto à proporção madeira/aglomerante (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5) a análise estatística indicou, que existe diferença estatística entre os compósitos avaliados. Ou seja, assim como nos compósitos

cimentícios, a proporção madeira/aglomerante é capaz de influenciar a densidade de massa endurecida dos compósitos.

É importante destacar que, a maior densidade de massa endurecida foi obtida para a composição produzida com a proporção madeira/aglomerante 0,0 (1.357,29 kg/m³) (amostra de referência), seguida pelas composições produzidas com as proporções madeira/aglomerante 1,0 (1.111,44 kg/m³), 1,5 (1.006,64 kg/m³), 2,0 (972,12 kg/m³) e, por fim, pela composição produzida com a proporção madeira/aglomerante 2,5 (902,20 kg/m³). A análise estatística indicou, também, que a composição produzida com a proporção madeira/aglomerante 2,5 tende a apresentar a menor densidade de massa endurecida quando comparada com as demais.

Por fim, observou-se que as densidades de massa endurecida dos compósitos contendo partículas de madeira recicladas foram significativamente inferiores aos resultados obtidos para as amostras de referência (proporção madeira/aglomerante 0,0).

Na FIGURA 4.2-7 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias dos compósitos de cimento-madeira produzidos com superplastificante. É possível observar que, de modo geral, quanto maior a proporção madeira/aglomerante presente na composição, maior tende a ser a resistência à tração na flexão.

FIGURA 4.2-7 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada diferença estatística entre os compósitos produzidos com os três tipos de madeira avaliados. Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (4,84 MPa) tendem a apresentar resistência à tração na flexão superior às partículas de eucalipto (2,98 MPa) que, por sua vez, tendem a apresentar a apresentar resistência à tração na flexão superior às partículas de pinus (1,97 MPa).

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0), foi obtida diferença estatística entre as proporções 0,0 (1,91 MPa) e 1,0 (2,40 MPa) quando comparadas às proporções 1,5 (3,81 MPa) e 2,0 (4,94 MPa). Ou seja, compósitos produzidos com partículas de madeira recicladas com as proporções 0,0 e 1,0 tendem a apresentar resistência à tração na flexão estatisticamente equivalentes.

Dessa maneira, os compósitos produzidos com as partículas de compensado ou com a proporção madeira/aglomerante 2,0 tendem a apresentar maior resistência à tração na flexão.

Na FIGURA 4.2-8 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias dos compósitos de gesso-madeira produzidos com superplastificante. Diferentemente dos compósitos cimentícios, é possível observar que, de modo geral, quanto menor a proporção madeira/aglomerante presente na composição, maior tende a ser a resistência à tração na flexão.

FIGURA 4.2-8 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos produzidos com os três tipos de madeira avaliados. Ou seja, independentemente do tipo de partícula de madeira – compensado (3,81 MPa), eucalipto (4,11 MPa) e pinus (3,92 MPa) –, os compósitos produzidos tendem a apresentar resistência à tração na flexão estatisticamente equivalentes.

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5), foi obtida equivalência estatística entre as proporções 1,0 (3,55 MPa), 1,5 (3,40 MPa) e 2,0 (3,16 MPa) e entre as proporções 2,0 (3,16 MPa) e 2,5 (2,61 MPa). O compósito produzido com a proporção madeira/aglomerante 0,0 (amostra de referência) (7,00 MPa) apresentou o maior valor para a resistência à tração na flexão.

Dessa maneira, independentemente do tipo de madeira, quanto menor a proporção madeira/aglomerante utilizada para a produção do compósito, maior tende a ser a resistência à tração na flexão.

Na FIGURA 4.2-9 estão apresentados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos compósitos de cimento-madeira produzidos com superplastificante. É possível observar que, de modo geral, quanto maior a proporção madeira/aglomerante presente na composição, menor tende a ser a resistência à compressão.

FIGURA 4.2-9 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada diferença estatística entre os compósitos produzidos com partículas de compensado (23,69 MPa) quando comparado aos compósitos produzidos com partículas de eucalipto (15,59 MPa) e pinus (13,79 MPa). Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado tendem a apresentar resistência à compressão superior aos compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pinus.

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0), foi obtida equivalência estatística entre as proporções madeira/aglomerante 1,5 (12,69 MPa) e 2,0 (11,40 MPa). O compósito produzido com a proporção madeira/aglomerante 0,0 (amostra de referência) (30,77 MPa) apresentou o maior valor para a resistência à compressão.

Dessa maneira, os compósitos produzidos com as partículas de compensado ou os compósitos produzidos com a proporção madeira/aglomerante 0,0 (amostra de referência), tendem a apresentar maior resistência à compressão.

Na FIGURA 4.2-10 estão apresentados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos compósitos de gesso-madeira produzidos com superplastificante. É possível observar que, de modo geral, assim como nos compósitos cimentícios, quanto maior a proporção madeira/aglomerante presente na composição, menor tende a ser a resistência à compressão.



FIGURA 4.2-10 – RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA COM SUPERPLASTIFICANTE

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos produzidos com os três tipos de madeira avaliados. Ou seja, independentemente do tipo de partícula de madeira – compensado (8,83 MPa), eucalipto (8,85 MPa) e pinus (8,42 MPa) –, os compósitos produzidos tendem a apresentar resistência à compressão estatisticamente equivalentes.

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (0,0 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5), foi obtida equivalência estatística entre as proporções madeira/aglomerante 1,0 (7,50 MPa), 1,5 (7,11 MPa) e 2,0 (6,90 MPa). O compósito produzido com a proporção madeira/aglomerante 0,0 (amostra de referência) (15,91 MPa) apresentou o maior valor para a resistência à compressão.

Dessa maneira, independentemente do tipo de madeira, quanto menor a proporção madeira/aglomerante utilizada para a produção do compósito, maior tende a ser a resistência à compressão. Neste mesmo sentido, outros pesquisadores (DIAS *et al.*, 2022) observaram que a incorporação de fibras de madeira em compósitos cimentícios leva a uma redução considerável da resistência à compressão em relação à amostra de referência. Assim como, em argamassas contendo agregados miúdos, a substituição de cimento Portland por serragem (em até 5% com relação à massa do aglomerante) também contribuiu para a diminuição da resistência à compressão (INCE *et al.*, 2021).

Callister Junior *et al.* (2012) explicam que os materiais compósitos são formados pela matriz e pela fase dispersa. Sendo que a fase dispersa é fortemente influenciada pela forma, pelo tamanho, pela distribuição e pela orientação das partículas. Callister Junior *et al.* (2012) descrevem, ainda, que as características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. Neste estudo, é possível entender a diferença entre as resistências à tração na flexão e à compressão dos compósitos desenvolvidos.

4.3. ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA RECICLADAS

4.3.1 Estudo do empacotamento a partir da comparação das curvas granulométricas com modelos da literatura

4.3.1.1. Comparação das curvas das composições granulométricas

As curvas experimentais das composições granulométricas das partículas de madeira recicladas de compensado, eucalipto e pínus, estão apresentadas na FIGURA 4.3-1a e TABELA 4.3-1, juntamente com as curvas das composições granulométricas obtidas a partir dos três modelos teóricos de empacotamento de partículas. Ressalta-se que foi necessário adotar, para os cálculos utilizando as Equações (5) e (6), um diâmetro máximo de 9,50 mm. Além disso, ao usar apenas as classes de tamanho de 9,5 mm a 0,15 mm (TABELA 3.4-1), a soma das porcentagens correspondentes a cada classe de tamanho não soma 100% ao usar a Equação (5) (FULLER e THOMPSON, 1907; ANDREASEN e ANDERSEN, 1930), razão pela qual as curvas das composições granulométricas desses modelos não atingem o valor da ordenada zero (FIGURA 4.3-1a). Isso ocorre pelo fato de que esses modelos não consideram um diâmetro mínimo de partícula para o conjunto granular, o que não representa os conjuntos reais de grãos, como explicado no item 3.4.1.1. Assim, os resultados das composições granulométricas foram normalizados para atender a um total de 100% (FIGURA 4.3-1b e TABELA 4.3-1). O mesmo foi feito para as composições originais de cada tipo de madeira (TABELA 4.3-1), uma vez que as partículas que passavam pela peneira de 0,15 mm foram descartadas, conforme mencionado no item 3.4.1.2. Pode-se observar na FIGURA 4.3-1b que as curvas das composições granulométricas de ambos os modelos (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) são coincidentes após a normalização, pois o valor de q utilizado para ambos foi o mesmo (q = 0,37, conforme mencionado anteriormente no item 3.4.1.1).





		1		-ş.10)				
C	Volume retido em cada fração (%)							
Composição	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,60 mm	0,30 mm	0,15 mm	1 otal (%)	
Partículas de	30,21	39,07	15,35	5,65	2,77	3,07	96,13	
compensado	31,43	40,65	15,97	5,88	2,88	3,20	100,00	
Partículas de	41,07	30,24	14,53	6,06	2,43	2,48	96,80	
eucalipto	42,43	31,24	15,01	6,26	2,51	2,56	100,00	
Partículas de pínus	36,48	29,19	15,81	7,45	3,01	3,44	95,39	
	38,24	30,60	16,57	7,81	3,15	3,61	100,00	
Modelo de Fuller e	28,92	20,82	14,72	10,41	7,36	5,20	87,43	
Thompson	33,07	23,81	16,84	11,91	8,42	5,95	100,00	
Modelo de Andreasen e Andersen	22,32	17,57	13,60	10,52	8,14	6,30	78,45	
	28,45	22,40	17,33	13,41	10,38	8,03	100,00	
Modelo de Funk e Dinger	28,45	22,40	17,33	13,41	10,38	8,03	100,00	

TABELA 4.3-1 – PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS OBTIDAS A PARTIR DE MODELOS TEÓRICOS DE EMPACOTAMENTO (OS VALORES EM NEGRITO REFEREM-SE AOS VALORES APÓS A NORMALIZAÇÃO)

FONTE: A autora (2023).

Quanto às curvas das composições granulométricas dos tipos de madeira, não foi observada diferença significativa entre estas. Assim como neste estudo, Masche *et al.* (2019) observaram que a análise das composições granulométricas apresentou distribuições de tamanho semelhantes para o *Austrian pine* – caracterizado como uma conífera - e cavacos *European beech* – caracterizado como uma folhosa. A distribuição de forma e tamanho das partículas depende dos parâmetros de moagem (martelo ou facas, velocidade de rotação, tipo e diâmetro das grades) e das características da matéria-prima (JESEN *et al.*, 2011; RADVILAITÈ *et al.*, 2018). Neste estudo, como o tempo e o equipamento utilizado para a moagem foram os mesmos para os três tipos de madeira, a forma das partículas provavelmente foi influenciada por características intrínsecas de cada madeira.

Ao contrário da maioria das partículas minerais que possuem geometria similar à esférica, as partículas lignocelulósicas são, geralmente, semelhantes a agulhas (TANNOUS *et al.*, 2013). Ao determinar as composições granulométricas das partículas de madeira recicladas, a dimensão da abertura da peneira tende a caracterizar a largura do cavaco de madeira, conforme explicado por Gravelsins (1998); Hartmann *et al.* (2006); Irizarry *et al.* (2017). Por isso, as composições granulométricas realizadas a partir do peneiramento tendem a não representar o comprimento e a espessura reais dos cavacos de madeira devido ao seu formato lamelar. Isto porque, a espessura do cavaco é significativamente menor do que as outras duas dimensões do cavaco, e os cavacos de madeira em peneiras menores são mais regulares em relação às suas dimensões do que os retidos em peneiras mais grossas (MASCHE *et al.*, 2019). No entanto, o menor tamanho de partícula de cada grão é obtido adequadamente por meio de peneiramento,

embora o comprimento possa ser maior em partículas lamelares, especialmente em peneiras mais grossas.

Ao comparar as curvas experimentais das composições granulométricas das partículas de madeira recicladas com as composições granulométricas recomendadas pelos modelos de empacotamento, pode-se observar, conforme apresentado na FIGURA 4.3-1b, que eles não se encaixam exatamente. Este comportamento já era esperado pois as curvas experimentais das composições granulométricas representam um único material. Este comportamento é comumente relatado na área de tecnologia do concreto, onde a combinação de diferentes materiais para se chegar a uma curva de composição granulométrica ideal é uma abordagem usual, conforme abordado por Yu et al. (2015) e Yousuf et al. (2019). Também é importante destacar que as partículas de madeira recicladas apresentam características morfológicas únicas. Assim, é possível que uma curva de composição granulométrica ideal para concreto seja diferente de uma composição granulométrica ideal para compósitos de madeira. Alguns autores (YU e STANDISH, 1993; KOCK e HUHN, 2007; NG et al., 2018) afirmam que a forma das partículas afeta diretamente o contato mecânico entre as partículas devido às diferentes orientações das partículas em um empacotamento. Apesar dessas características de forma influenciarem no empacotamento, é importante notar que elas não são consideradas pelos modelos de empacotamento estudados (FULLER e THOMPSON, 1907; ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980). Nesse sentido, é necessário não apenas comparar as curvas experimentais das composições granulométricas e as composições granulométricas recomendadas pelos modelos de empacotamento, mas também medir a densidade de empacotamento de cada das composições granulométricas quando composta com as partículas de madeira recicladas. Para isso, foi utilizado o CPM (DE LARRARD e SEDRAN, 1994; DE LARRARD, 1999).

4.3.1.2. Determinação experimental da densidade de empacotamento para cada classe de tamanho

A massa unitária e a densidade de empacotamento de cada classe de tamanho são apresentadas na FIGURA 4.3-2. As densidades de empacotamento foram calculadas de acordo com a Equação (4), e foram usadas como dados de entrada para o CPM (DE LARRARD e SEDRAN, 1994; DE LARRARD, 1999).



FIGURA 4.3-2 – MASSA UNITÁRIA (a) E DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO (b) DAS CLASSES DE TAMANHO DE CADA TIPO DE MADEIRA

É possível observar na FIGURA 4.3-2a diferentes comportamentos para massa unitária em relação aos tipos de madeira e as classes avaliadas. As massas unitárias da madeira são sensíveis ao tamanho, forma e teor de umidade das partículas (MASCHE *et al.*, 2019). Em relação ao compensado, os valores obtidos variaram entre 206 kg/m³ para classe 1 e 285 kg/m³ para classe 6. Por outro lado, para o eucalipto as massas unitárias variaram entre 182 kg/m³ e 245 kg/m³. No entanto, a classe 1 apresentou o maior valor, enquanto as classes 5 e 6 apresentaram os menores valores. Esse comportamento foi o mesmo observado por Tanui *et al.* (2020) cuja massa unitária obtida para cavacos de eucalipto (partículas maiores) foi maior que

para a serragem de eucalipto (partículas menores). Esse comportamento pode ser explicado pelas maiores forças atrativas entre partículas menores devido às interações de *van der Waals* (LU *et al.*, 2017). Isso acontece porque para as partículas menores as forças interpartículas superam as forças da gravidade. Assim, há a maior tendência de aglomeração, reduzindo a massa unitária.

Por fim, para o pínus as massas unitárias variaram entre 218 kg/m³ e 250 kg/m³, mas esses dois valores referem-se às classes 5 e 6, respectivamente. Este tipo de madeira apresentou valores de massa unitária próximos entre as classes 1 a 4 (225 kg/m³ a 240 kg/m³). A literatura que avaliou diferentes densidades de empacotamento de partículas de pínus para uso como combustível, obteve valores de massa unitária entre 50 kg/m³ e 185 kg/m³ considerando aparas finas de madeira, maravalhas de Pinus, serragem de Pinus, e misturas com aparas finas de madeira e serragem (SAASTAMOINEN *et al.*, 2000; HORTTANAINEN *et al.*, 2000 *apud* HORTTANAINEN *et al.*, 2002; SAASTAMOINEN *et al.*, 2001; HORTTANAINEN *et al.*, 2002). Outros pesquisadores (MANOUCHEHRINEJAD *et al.*, 2018) obtiveram valores de massa unitária para cavacos de madeira de *southern yellow pine* (238,06 kg/m³) como este estudo.

Considerando o comportamento dos diferentes tipos de madeira em relação às classes de tamanho avaliadas, o compensado apresentou comportamento semelhante ao pínus, pois ambos apresentam a maior massa unitária na classe 6 (partículas menores). Esse resultado pode estar relacionado ao formato das partículas de cada classe de tamanho. Os painéis de compensado são produzidos a partir de finas camadas de madeira – geralmente coníferas (madeiras macias) – que são empilhadas ortogonalmente em um número ímpar de camadas. Essas camadas são coladas umas às outras usando resinas fenólicas (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

A FIGURA 4.3-2b mostra os resultados de densidade de empacotamento experimental para cada tipo e classe de madeira. Em relação ao compensado, a densidade de empacotamento experimental obtida variou entre 0,540 para a classe 1 e 0,747 para a classe 6. Por outro lado, para o eucalipto, as densidades de empacotamento experimentais variaram entre 0,524 para a classe 5 (estaticamente equivalente à classe 6 quando observado o desvio padrão da massa unitária, FIGURA 4.3-2) e 0,703 para a classe 1. Masche *et al.* (2019) observaram o mesmo comportamento ao avaliar outra espécie de folhosa – madeira dura – em comparação com uma conífera – madeira macia. O mesmo comportamento também foi observado por Tanui *et al.*, (2020); entretanto, os resultados obtidos por esses autores variaram entre 0,26 e 0,48. A

discrepância entre os resultados obtidos está relacionada à massa específica do eucalipto utilizado, isso porque Tanui *et al.*, (2020) atingiu o valor de 1220 kg/m³ enquanto neste estudo o valor é de 347,64 kg/m³.

Por fim, para as partículas de pínus, a densidade de empacotamento experimental variou entre 0,693 e 0,793. Este tipo de madeira apresentou valores próximos entre as classes 1 a 4 (0,716 a 0,762). Ao contrário do que foi observado para as partículas de compensado e de eucalipto, a menor densidade de empacotamento experimental (0,693) foi obtida para a classe 5, enquanto a maior massa unitária (0,793) foi obtida para a classe 6. Lenis *et al.* (2016) e González *et al.* (2018) compararam a partícula de empacotamento obtida usando três diferentes formas de biomassa de madeira macia: cavacos (6 a 13 mm), cilindros (α 10 × L8 mm) e prisma quadrado (10×10×8), seus fatores de empacotamento experimental entre 0,10 e 0,35 para aparas finas de madeira, maravalhas de Pinus, serragem de Pinus, e misturas com aparas finas de madeira e serragem (SAASTAMOINEN *et al.*, 2000; HORTTANAINEN *et al.*, 2000 *apud* HORTTANAINEN *et al.*, 2002; SAASTAMOINEN *et al.*, 2001; HORTTANAINEN *et al.*, 2002). Os valores encontrados por esses autores são influenciados pela massa específica da madeira utilizada.

Considerando o comportamento dos tipos de madeira em relação às classes avaliadas, é possível observar que a partícula de compensado apresentou comportamento semelhante às partículas de pínus, pois apresenta a maior densidade de empacotamento experimental da classe 6. Como observado neste estudo para as partículas de compensado e de pínus (nas classes 5 e 6), quanto menor o tamanho da partícula, maior tende a ser a densidade de empacotamento. Comportamento semelhante foi observado por Sackey e Smith (2010) utilizando o *lodgepole pine*. Comparando os tamanhos das partículas foram classificadas como fino (> 0,5 mm), médio (> 1 mm) e grosso (> 2 mm), verificou-se que para composições contendo apenas um tipo de partícula, a menor porosidade foi obtida para as partículas finas, seguida de média e grossa. Tannous *et al.* (2013) explicam que as partículas de *Douglas fir* – madeira macia – mudam de forma lamelar para mais próxima de esférica com diminuição do diâmetro médio das partículas, levando a uma maior densidade de empacotamento. Esses autores (TANNOUS *et al.*, 2013) verificaram que a porosidade neste estudo com o aumento do diâmetro das partículas. O mesmo comportamento foi observado neste estudo. A massa unitária e a densidade de empacotamento de cada classe de tamanho são mostradas na FIGURA 4.3-2 a e FIGURA 4.3-2b. A FIGURA 4.3-3 apresenta a análise de regressão entre esses resultados.



FIGURA 4.3-3 – ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE OS RESULTADOS DA MASSA UNITÁRIA (FIGURA 4.3-2a) E DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO (FIGURA 4.3-2b)

É possível observar na FIGURA 4.3-3 uma boa correlação entre os resultados de massa unitária e densidade de empacotamento para cada tipo de madeira. Isso era esperado considerando que a densidade de empacotamento é calculada a partir da massa unitária (Equação (4)) e a massa específica dos três tipos de madeira estudados são semelhantes entre si. De acordo com a equação ajustada para os modelos de regressão linear, com $R^2 = 1,0$, a relação entre esses parâmetros varia de 315 a 380 conforme o tipo de madeira.

É importante destacar que o uso das partículas de pínus com dimensões de 0,15 mm a 0,30 mm (classe 6) deve ser realizada para a produção de compósitos quando for possível separar as classes. Isso ocorre porque a densidade de empacotamento experimental é de 12,8% maior que as partículas de eucalipto. Entretanto, caso seja necessário utilizar o eucalipto, devem ser utilizadas partículas com dimensões de 4,75 mm a 9,50 mm (classe 1). Desta forma, a quantidade de aglutinante utilizada será menor.

4.3.1.3. Predição e determinação experimental da densidade de empacotamento para as curvas das composições granulométricas

A FIGURA 4.3-4 mostra as densidades de empacotamento calculadas utilizando o CPM (DE LARRARD e SEDRAN, 1994; DE LARRARD, 1999) (FIGURA 4.3-4a) e os

resultados experimentais (FIGURA 4.3-4b) da densidade de empacotamento para as curvas das composições granulométricas das partículas de compensado, eucalipto e pínus, bem como para as curvas das composições granulométricas determinadas a partir dos modelos de empacotamento de partículas (FULLER e THOMPSON, 1907; ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980).

Foram utilizados os valores normalizados apresentados na TABELA 4.3-1. Os resultados apresentados na FIGURA 4.3-4b foram obtidos a partir da determinação da massa unitária (realizada em laboratório) e calculados de acordo com a Equação (4).





A partir da FIGURA 4.3-4a observa-se que para partículas de compensado, a densidade de empacotamento variou entre 0,605 e 0,663. A menor densidade de empacotamento (0,605) foi obtida para a composição original, seguida pela curva da composição granulométrica de Fuller (FULLER e THOMPSON, 1907) (0,647) e, com a maior densidade de empacotamento para as curvas das composições granulométricas de Andreasen e Andersen e de Funk e Dinger (Andreasen modificado ou modelo de Alfred) (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) (0,663). Nota-se que as curvas das composições granulométricas dos modelos de empacotamento resultaram em partículas mais finas na composição (TABELA 4.3-1). Assim, como as partículas mais finas apresentaram maiores densidades individuais de empacotamento (FIGURA 4.3-2b - cujo maior valor foi obtido para a classe 6), aumentou a densidade de empacotamento dos conjuntos granulares dos modelos para a partícula de compensado. Além disso, observa-se que as densidades de empacotamento obtidas dos modelos Andreasen e Andreasen e Funk e Dinger (Andreasen modificado ou modelo de Alfred) (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) são coincidentes, conforme explicado anteriormente no item 4.3.1.1. A composição desses dois modelos resultou na maior densidade de empacotamento (tanto para o CPM quanto para os resultados experimentais) para as partículas de compensado, o que pode ter resultado do valor do coeficiente q utilizado que proporcionou o maior teor de finos na composição, como já mencionado.

O mesmo comportamento foi observado para as partículas de pínus, que apresentaram a maior densidade de empacotamento (0,754) com a composição indicada nos modelos de Andreasen e Andersen e de Funk e Dinger (Andreasen modificado ou modelo de Alfred) (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980). Seguido pelas curvas das composições granulométricas de Fuller (FULLER e THOMPSON, 1907) (0,750), com a menor densidade de empacotamento para a composição original (0,730). Conforme observado na TABELA 4.3-1 e na FIGURA 4.3-2b, as partículas de pínus também apresentam maior quantidade de partículas finas nessas composições e estas partículas finas apresentaram maiores densidades individuais de empacotamento.

Para as partículas de eucalipto, a densidade de empacotamento variou de 0,647 a 0,654. Novamente, a menor densidade de empacotamento (0,647) foi obtida na composição original. Por outro lado, diferente dos resultados obtidos para as partículas de compensado e de pínus, o maior valor (0,654) foi obtido com a composição indicada pela curva de Fuller (FULLER e THOMPSON, 1907). Seguido pelas curvas dos modelos de Andreasen e Andersen e de Funk e Dinger (Andreasen modificado ou modelo de Alfred) (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) (0,649), com a menor densidade de empacotamento para a composição original (0,647). Esse comportamento deve-se à maior densidade de empacotamento das classes de granulometria de grãos mais grossos (conforme explicado anteriormente no item 4.3.1.2) e a curva de Fuller (FULLER e THOMPSON, 1907) possuir partículas maiores em sua composição, em comparação com os outros dois modelos.

Comparando os três tipos de madeira, observa-se que as partículas de pínus apresentaram as maiores densidades de empacotamento devido à maior densidade de empacotamento individual de cada classe (FIGURA 4.3-2b). Além disso, outros pesquisadores (TANNOUS *et al.*, 2013) também observaram que as partículas de coníferas – representadas neste estudo pelo pínus – resultou em uma densidade de empacotamento maior do que para partículas de folhosas – representada neste estudo pelo eucalipto.

A partir da FIGURA 4.3-4b observa-se que para partículas de compensado os resultados de densidade de empacotamento experimental variaram entre 0,654 e 0,739. A menor densidade de empacotamento (0,654) foi obtida para a composição original, seguida pela curva Fuller (FULLER e THOMPSON, 1907) (0722) e, com a maior densidade de empacotamento para a curva dos modelos de Andreasen e Andersen e de Funk e Dinger (Andreasen modificado ou modelo de Alfred) (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) (0,739). O mesmo foi observado na FIGURA 4.3-4a para densidades de empacotamento das partículas calculadas de acordo com o CPM. Este comportamento deve-se ao fato de os modelos de curva de otimização resultarem em mais partículas finas na composição (TABELA 4.3-1) e as partículas mais finas apresentarem maiores densidades individuais de empacotamento (FIGURA 4.3-2b, o maior valor foi obtido na classe 6). Além disso, partículas mais finas preenchem os vazios formados entre partículas maiores, produzindo misturas mais densas (TABIL, 1996). Portanto, quanto mais partículas finas na composição, maior será a densidade de empacotamento do conjunto de classes para as partículas de compensado. Comparando os resultados obtidos nas FIGURA 4.3-4a e FIGURA 4.3-4b para o compensado, observou-se que as densidades de empacotamento calculadas pelo CPM variaram entre 0,605 e 0,663. Por outro lado, os resultados obtidos para a densidade de empacotamento experimental atingiram valores entre 0,654 e 0,739. Em média, os resultados experimentais foram 10,7% superiores ao CPM. O fato de o CPM ter sido desenvolvido para agregados - o que pode exigir ajustes nos parâmetros utilizados para cálculo, principalmente o valor K utilizado - pode explicar a discrepância entre os resultados calculados e os experimentais. Comparando os resultados da

FIGURA 4.3-4b com a FIGURA 4.3-2b, nota-se que a densidade de empacotamento experimental da composição original e dos modelos foi superior à média das classes individuais para as partículas de compensado (1,4% e 13,7%).

Comportamento semelhante foi observado para as partículas de pínus que apresentaram a maior densidade experimental de empacotamento (0,869) com os modelos teóricos de empacotamento. Conforme observado na TABELA 4.3-1 e na FIGURA 4.3-2b, as partículas de pínus também apresentam partículas mais finas nessas composições e as partículas finas apresentaram maiores densidades individuais de empacotamento. Comparando os resultados obtidos nas FIGURA 4.3-4a e FIGURA 4.3-4b, observou-se que as densidades de empacotamento calculadas pelo CPM variaram entre 0,730 e 0,754. Por outro lado, os resultados experimentais atingiram valores entre 0,843 e 0,869. Em média, os resultados experimentais foram 15,4% superiores ao CPM. Comparando os resultados da FIGURA 4.3-4b com a FIGURA 4.3-2b, nota-se que a densidade de empacotamento experimental da composição original e dos modelos foi superior à média das classes individuais para as partículas de pínus (13,4% e 16,9%).

Para as partículas de eucalipto, a densidade de empacotamento experimental variou de 0,743 a 0,773. A menor densidade de empacotamento (0,743) foi obtida da curva de Fuller (FULLER e THOMPSON, 1907), seguida pela composição original (0,758), com a maior densidade de empacotamento para as curvas dos modelos de Andreasen e Andersen e de Funk e Dinger (Andreasen modificado ou modelo de Alfred) (ANDREASEN e ANDERSEN, 1930; FUNK e DINGER, 1980) (0,773). Comparando os resultados obtidos nas FIGURA 4.3-4a e FIGURA 4.3-4b, observou-se que as densidades de empacotamento calculadas pelo CPM variaram entre 0,647 e 0,654. Por outro lado, os resultados experimentais atingiram valores entre 0,743 e 0,773. Em média, os resultados experimentais foram 17,2% superiores ao CPM. Também é interessante destacar que ao usar CPM, a maior densidade de empacotamento foi alcançada para a curva da composição granulométrica proposta por Fuller. Entretanto, os experimentos mostraram que essa curva resultou no menor valor de densidade de empacotamento. Desta maneira, entende-se que o modelo não foi capaz de representar o comportamento das partículas de madeira recicladas nesta situação. Comparando os resultados da FIGURA 4.3-4b com a FIGURA 4.3-2b, percebe-se que a densidade de empacotamento experimental da composição original e dos modelos foi superior à média das classes individuais para as partículas de eucalipto (26,4% e 27,2%).

Analisando os três tipos de madeira, observa-se que as partículas de pínus apresentaram as maiores densidades de empacotamento experimentais (0,843 a 0,869) devido à maior densidade de empacotamento individual de cada classe (FIGURA 4.3-2b). Seguido pelas partículas de eucalipto (0,743 a 0,773) e, por fim, as partículas de compensado (0,654 a 0,739).

É importante destacar que as densidades de empacotamento experimentais das curvas das composições granulométricas (FIGURA 4.3-4b) foram superiores aos valores de densidade de empacotamento de cada classe de tamanho individual (FIGURA 4.3-2b) para as partículas de eucalipto e pínus. As partículas de compensado não apresentaram esse comportamento, pois a classe 6 apresentou maior densidade de empacotamento (0,747 na FIGURA 4.3-2b) do que as composições dos conjuntos granulares estudados (0,739 na FIGURA 4.3-4b). Pesquisadores (YU e STANDISH, 1993) explicam que para partículas esféricas a porosidade de uma mistura contendo partículas de tamanhos variados é menor que a de partículas de tamanho único. No entanto, o mesmo não pode ser dito para partículas de compensado em forma lamelar.

Em geral, os valores de densidade de empacotamento experimental – que variaram de 0,654 a 0,869 (FIGURA 4.3-4b) – podem ser considerados elevados quando comparados às densidades de empacotamento de conjuntos granulares utilizados para a produção de concretos. Para pastas de cimento, por exemplo, os valores de densidade de empacotamento experimental apresentados na literatura variam de 0,599 (KLEIN *et al.*, 2016), 0,653 (CAMPOS *et al.*, 2020a; CAMPOS *et al.*, 2020b) e 0,622 (WONG e KWAN, 2008). Para agregados, a literatura apresenta o valor de 0,733 para areia e 0,574 a 0,578 para agregados graúdos (CAMPOS *et al.*, 2018) simularam a densidade de empacotamento de diferentes elementos (em forma de areia com o molde esférico, em forma de areia com molde elipsoidal e em forma de lascas de madeira) obtendo densidades de empacotamento mais baixas para os elementos em forma de lascas de madeira porque eles tiveram a menor fração de volume sólido em comparação com as outras formas simuladas.

4.3.2 Estudo do empacotamento a partir da aplicação do modelo de Alfred no proporcionamento dos materiais para a produção de compósitos

Na TABELA 4.3-2 estão apresentadas as quantidades de cada tipo de material – obtidas a partir da aplicação do código desenvolvido em $Python^{\text{®}}$ – necessárias para obter os

conjuntos com menor (q = 0,21) e maior (q = 0,37) densidade de empacotamento a partir do modelo de Alfred, bem como a proporção madeira/aglomerante (em volume) do respectivo conjunto. As composições binárias referem-se aos conjuntos contendo um aglomerante e um tipo de partícula de madeira, e as composições ternárias referem-se aos conjuntos contendo dois aglomerantes e um tipo de partícula de madeira.

		Quanti	dade de materiais (%)	Proporção madeira/aglomerante		
Identificação	Aglomerante		Dantíaula da madaina		Total	
	Cimento	Gesso	rarucula de madeira	Totai	(cm volume)	
B21CC	35,00	-	65,00	100,00	1,857	
B21CE	35,00	-	65,00	100,00	1,857	
B21CP	35,00	-	65,00	100,00	1,857	
B21GC	-	31,00	69,00	100,00	2,226	
B21GE	-	31,00	69,00	100,00	2,226	
B21GP	-	31,00	69,00	100,00	2,226	
T21CGC	23,12	12,65	64,23	100,00	1,796	
T21CGE	23,20	10,96	65,84	100,00	1,927	
T21CGP	29,28	7,33	63,39	100,00	1,731	
B37CC	19,00	-	81,00	100,00	4,263	
B37CE	19,00	-	81,00	100,00	4,263	
B37CP	19,00	-	81,00	100,00	4,263	
B37GC	-	17,00	83,00	100,00	4,882	
B37GE	-	17,00	83,00	100,00	4,882	
B37GP	-	17,00	83,00	100,00	4,882	
T37CGC	12,14	2,38	85,48	100,00	5,887	
T37CGE	9,36	8,89	81,75	100,00	4,479	
T37CGP	12,14	3,04	84,82	100,00	5,588	

TABELA 4.3-2 – QUANTIDADE DE CADA TIPO DE MATERIAL NECESSÁRIA PARA OBTER OS CONJUNTOS COM MAIOR DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO

FONTE: A autora (2023).

Considerando a aplicação do modelo de Alfred e adotando q = 0,21 foi observado que, para as composições binárias, as proporções madeira/aglomerante resultaram em 1,857 para os compósitos cimento-madeira e 2,226 para os compósitos gesso-madeira. Para as composições ternárias, as proporções madeira/aglomerante para as partículas de compensado, eucalipto e pinus resultaram em 1,796, 1,927 e 1,731, respectivamente. Entretanto, ao reproduzir experimentalmente em laboratório as composições ternárias, observou-se a diminuição da trabalhabilidade devido à presença de dois aglomerante diferentes e, por isso, estas composições foram desconsideradas para a continuidade do estudo. Adotando q = 0,37, para as composições binárias, as proporções madeira/aglomerante resultaram em 4,263 para os compósitos cimento-madeira e 4,882 para os compósitos gesso-madeira. Para as composições ternárias, as proporções madeira/aglomerante para as partículas de compensado, eucalipto e pinus resultaram em 5,887, 4,479 e 5,588, respectivamente.

É importante destacar que as proporções madeira/aglomerante apresentadas na TABELA 4.3-2 devem ser comparadas aos resultados apresentados no item 4.2.1. Isto porque, no item 4.2.1 está demonstrado que para composições com proporção madeira/aglomerante superior a 2,0 para compósitos cimento-madeira (FIGURA 4.2-1) e superior a 2,5 para compósitos gesso-madeira (FIGURA 4.2-2), o índice de consistência tende a ser inferior ao necessário para viabilizar a produção de placas. Desta maneira, observa-se, a partir da TABELA 4.3-2, que proporções madeira/aglomerante obtidas a partir da aplicação do modelo de Alfred e adotando q = 0,37 e, que tendem a apresentar a maior densidade de empacotamento (KUMAR e SANTHANAM, 2003), não apresentam viabilidade de produção.

Na FIGURA 4.3-5 estão apresentadas as composições granulométricas dos conjuntos – obtidas a partir da aplicação do código desenvolvido em *Python*[®] – necessárias para obter menor densidade de empacotamento a partir do modelo de Alfred considerando q = 0,21.



FIGURA 4.3-5 – COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS CONJUNTOS BINÁRIOS PARA OBTER MAIOR DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO A PARTIR DO MODELO DE ALFRED CONSIDERANDO

168

É importante destacar que as composições granulométricas dos conjuntos binários, obtidas a partir da aplicação do modelo de Alfred e adotando q = 0,21, que possuem o mesmo aglomerante, encontram-se discretamente agrupadas. Ainda assim, é possível observar que as composições são similares entre si. A composição granulométrica que representa o modelo de Alfred para q = 0,21, está indicada em preto, e representa o conjunto cuja densidade de empacotamento tende a proporcionar a maior fluidez para o compósito (KUMAR e SANTHANAM, 2003) quando comparado ao modelo de Alfred adotando q = 0,37.

4.4. ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNA

4.4.1. Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e químicas

De acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021) que trata das chapas de gesso para *drywall* – Parte 1: Requisitos, os limites para as características físicas e mecânicas das chapas de gesso para *drywall* com espessura de 12,5 mm são a densidade superficial de massa entre 8,0 e 12,0 kg/m² e a resistência mínima à ruptura na flexão (na transversal) de 210N. Para os resultados de resistência à ruptura na flexão, foi considerada a configuração do ensaio e os valores apresentados e discutidos foram convertidos para MPa. Desta maneira, a resistência mínima à ruptura na flexão (na transversal) indicada pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021) é de 2,35 MPa. O intervalo admitido para a densidade superficial de massa e o valor de resistência mínima à ruptura na flexão (na transversal) estão identificados nas figuras pela linha tracejada em cor vermelha.

É importante destacar que são consideradas amostras de referência: as placas produzidas com cimento Portland (sem partículas de madeira recicladas), as placas produzidas com gesso (sem partículas de madeira recicladas) e a placa de *drywall standard* adquirida no comércio local.

Na FIGURA 4.4-1 estão apresentados os resultados de densidade superficial de massa das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira aos 28 dias.



FIGURA 4.4-1 – RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha inferior representa o valor mínimo de densidade superficial de massa de 8,0 kg/m² de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021). A linha tracejada vermelha superior representa o valor máximo de densidade

superficial de massa de 12,0 kg/m² de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

É possível observar que, de modo geral, para os compósitos cimento-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto existe uma tendência de diminuição da densidade de massa superficial quanto maior a proporção madeira/aglomerante. O mesmo não foi observado para os compósitos produzidos com as partículas de pinus.

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos produzidos com partículas de compensado e pinus, e entre os compósitos produzidos com eucalipto e pinus. Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (12,19 kg/m²) e pinus (12,80 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa equivalentes. Assim como, os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (14,01 kg/m²) e pinus (12,80 kg/m²). Por outro lado, os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (14,01 kg/m²) e pinus (12,80 kg/m²). Por outro lado, os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (14,01 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa superior aos compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (14,01 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa superior aos compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (14,01 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa superior aos compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (14,01 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa superior aos compósitos produzidos com as partículas de compensado (12,19 kg/m²).

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (1,50-1,86-2,00), foi obtida equivalência estatística entre as proporções madeira/aglomerante utilizadas para a produção dos compósitos. Ou seja, independentemente da proporção

madeira/aglomerante utilizada – 1,50 (13,47 kg/m²), 1,86 (13,09 kg/m²), 2,00 (12,44 kg/m²) –, os resultados de densidade superficial de massa tendem a ser equivalentes.

Dessa maneira, os compósitos produzidos com as partículas de compensado ou pinus, independentemente da proporção madeira/aglomerante tendem a apresentar menor densidade superficial de massa. Com exceção da composição contendo compensado na proporção madeira/aglomerante 2,00 – todas as composições produzidas apresentaram densidade superficial de massa superior ao limite estabelecido na NBR 14715-1 (ABNT, 2021). Entretanto, a NBR 14715-1 (ABNT, 2021) aborda os requisitos para placas de *drywall* – que são produzidas com gesso. É importante destacar que a massa específica do cimento Portland é superior à do gesso, contribuindo para o aumento da densidade superficial de massa das placas produzidas com compósitos cimentícios.

Na FIGURA 4.4-2 estão apresentados os resultados de densidade superficial de massa das placas produzidas com compósitos de gesso-madeira aos 28 dias. É possível observar que, de modo geral, assim como nos compósitos cimentícios, para os compósitos gesso-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto existe uma tendência de diminuição da densidade de massa superficial quanto maior a proporção madeira/aglomerante. Assim como nos compósitos cimentícios, o mesmo não foi observado para os compósitos produzidos com as partículas de pinus.



FIGURA 4.4-2 – RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA



NBR 14715-1 (ABNT, 2021). A linha tracejada vermelha superior representa o valor máximo de densidade superficial de massa de 12,0 kg/m² de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos produzidos com partículas de compensado e eucalipto, e entre os compósitos produzidos com eucalipto e pinus. Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (11,08 kg/m²) e eucalipto (10,42 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa equivalentes. Assim como, os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (10,42 kg/m²). Por outro lado, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (11,08 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa equivalentes. Assim como, os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (10,42 kg/m²). Por outro lado, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (11,08 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa superior aos compósitos produzidos com as partículas de pinus (10,15 kg/m²).

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (2,00 - 2,22 - 2,50), foi obtida equivalência estatística entre os compósitos produzidos com as proporções madeira/aglomerante de 2,00 e 2,22, e entre os compósitos produzidos com as proporções madeira/aglomerante de 2,22 e 2,50. Ou seja, os compósitos produzidos com as proporções madeira/aglomerante de 2,00 (11,03 kg/m²) e 2,22 (10,55 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa equivalentes. Assim como, os compósitos produzidos com as proporções madeira/aglomerante de 2,22 (10,55 kg/m²) e 2,50 (10,06 kg/m²).

Dessa maneira, os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto ou pinus, ou proporções madeira/aglomerante de 2,22 ou 2,50 tendem a apresentar menor densidade superficial de massa. É importante destacar que – diferentemente dos compósitos cimentícios – todas as composições produzidas (exceto as amostras de referência de cimento Portland e gesso) apresentaram densidade superficial de massa no intervalo (8,0 a 12,0 kg/m²) estabelecido pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

De modo geral, quanto maior a quantidade de madeira, menor tende a ser a densidade de massa da composição (MORALES-CONDE *et al.*, 2016). Pesquisadores (KUQO, MAI, 2021) explicam, ainda, que em compósitos de gesso com fibras de madeira, quanto menor a densidade da composição, menor tende a ser sua condutividade térmica e, consequentemente, mais adequado torna-se o material para fins de isolamento.

Na FIGURA 4.4-3 estão apresentados os resultados de ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira aos 28 dias. É possível observar que, de modo geral, para os compósitos cimento-madeira produzidos com as partículas de eucalipto e pinus existe uma tendência do aumento da ruptura à flexão quanto maior a proporção

madeira/aglomerante. O mesmo não foi observado para os compósitos produzidos com as partículas de compensado.



FIGURA 4.4-3 – RESULTADO DA RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha representa o valor mínimo de resistência à ruptura na flexão de 2,35 MPa (que equivale a 210 N) de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos produzidos com partículas de compensado, eucalipto e pinus. Ou seja, independentemente do tipo de madeira utilizada – compensado (2,64 MPa), eucalipto (2,54 MPa), pinus (2,52 MPa) – , os resultados de ruptura à flexão tendem a ser equivalentes.

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (1,50 - 1,86 - 2,00), foi obtida equivalência estatística entre as proporções madeira/aglomerante utilizadas para a produção dos compósitos. Ou seja, independentemente da proporção madeira/aglomerante utilizada – 1,50 (2,46 MPa), 1,86 (2,58 MPa), 2,00 (2,66 MPa) –, os resultados de ruptura à flexão tendem a ser equivalentes.

É importante destacar que todas as composições produzidas (exceto a amostra de referência de cimento Portland) apresentaram ruptura à flexão superior ao estabelecido pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021) (2,35 MPa).

Na FIGURA 4.4-4 estão apresentados os resultados de ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de gesso-madeira aos 28 dias. É possível observar que, de modo

geral, para os compósitos gesso-madeira produzidos não há uma tendência a respeito do comportamento quanto ao tipo de madeira e à proporção madeira/aglomerante.



FIGURA 4.4-4 – RESULTADO DA RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha representa o valor mínimo de resistência à ruptura na flexão de 2,35 MPa (que equivale a 210 N) de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos produzidos com partículas de compensado, eucalipto e pinus. Ou seja, independentemente do tipo de madeira utilizada – compensado (1,46 MPa), eucalipto (1,68 MPa), pinus (1,35 MPa) – , os resultados de ruptura à flexão tendem a ser equivalentes.

Ao considerar como fator a proporção madeira/aglomerante presente na composição (1,50 - 1,86 - 2,00), foi obtida equivalência estatística entre as proporções madeira/aglomerante utilizadas para a produção dos compósitos. Ou seja, independentemente da proporção madeira/aglomerante utilizada – 1,50 (1,52 MPa), 1,86 (1,37 MPa), 2,00 (1,59 MPa) –, os resultados de ruptura à flexão tendem a ser equivalentes.

É importante destacar que, diferente do observado para os compósitos cimentícios, nenhuma composição produzida (exceto a amostra de referência de gesso) apresentou ruptura à flexão superior ao estabelecido pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021) (2,35 MPa).

Pesquisadores (DAI, FAN, 2015) verificaram que os principais fatores que afetam o desempenho mecânico do compósito de gesso com serragem podem ser a má interface entre

serragem e gesso, e o alto teor de água no interior do compósito devido à absorção de água da serragem. Isto porque, a água poderia se infiltrar entre os cristais de gesso e proteger parcialmente as ligações, o que enfraqueceria a estrutura sólida do gesso (DAI, FAN, 2015). Outros pesquisadores (LI *et al.*, 2020) explicam que a adesão entre as fibras e a matriz de gesso é insatisfatória, principalmente para as fibras naturais, para as quais a adesão é baixa devido ao seu comportamento hidrofílico e à absorção de umidade relativamente alta.

Nas FIGURA 4.4-5 e FIGURA 4.4-6 estão apresentados os resultados do consumo de aglomerante das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira.



FIGURA 4.4-5 – RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

Para os compósitos de cimento-madeira, os valores encontram-se entre 630 e 709 kg/m³. Enquanto, para os compósitos de gesso-madeira, os valores encontram-se entre 475 e 528 kg/m³. Nas amostras de referência, ou seja, amostras produzidas sem as partículas de madeira recicladas, o consumo de cimento foi de 1134 kg/m³ e o de gesso foi de 917 kg/m³. É importante destacar que, a relação água/aglomerante é de 0,50 para as composições com cimento e de 0,70 para as composições com gesso. Os resultados indicam que, quanto maior a proporção madeira/aglomerante, menor é o consumo de aglomerante para a produção do compósito. Este comportamento já era esperado.

Nas FIGURA 4.4-7 e FIGURA 4.4-8 estão apresentados os resultados do consumo de aglomerante por resistência das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira aos 28 dias. Para os compósitos de cimento-madeira, os valores encontram-se entre 213 e 303 kg/m³/MPa. Enquanto, para os compósitos de gesso-madeira, os valores encontram-se entre 258 e 605 kg/m³/MPa. Nas amostras de referência, ou seja, amostras produzidas sem as partículas de madeira recicladas, o consumo de cimento por resistência de ruptura à flexão foi de 587 kg/m³/MPa e o de gesso foi de 198 kg/m³/MPa.

FIGURA 4.4-7 – RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA



LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).



FIGURA 4.4-8 – RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

Para os compósitos de cimento-madeira produzidos com as partículas de eucalipto e pinus, existe uma tendência de que quanto maior a proporção madeira/aglomerante, menor tende a ser o consumo de aglomerante por resistência. No compósito produzido com as partículas de compensado, o menor consumo de aglomerante por resistência foi obtido para a proporção madeira/aglomerante de 1,86 (proporção intermediária).

Por outro lado, para os compósitos de gesso-madeira não há uma tendência a respeito do comportamento ao correlacionar a proporção madeira/aglomerante e o consumo de aglomerante por resistência. Isto porque, o menor consumo de aglomerante por resistência foi obtido para a proporção madeira/aglomerante de 2,00 para as partículas de compensado, 2,22 para as partículas de eucalipto e 2,50 para as partículas de pinus.

Nas FIGURA 4.4-9 e FIGURA 4.4-10 estão apresentados os resultados de densidade superficial de massa por resistência de ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira aos 28 dias.



FIGURA 4.4-9 – RESULTADO DA DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).





FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

Para os compósitos de cimento-madeira, os valores encontram-se entre 4,2 e 6,3 kg/m²/MPa. Enquanto, para os compósitos de gesso-madeira, os valores encontram-se entre 5,4 e 11,8 kg/m²/MPa. Nas amostras de referência, ou seja, amostras produzidas sem as partículas de madeira recicladas, a densidade superficial de massa por resistência para o cimento foi de 10,0 kg/m²/MPa, a de gesso foi de 3,5 kg/m²/MPa e a de *drywall* foi de 2,3 kg/m²/MPa. Para os

compósitos de cimento-madeira produzidos com as partículas de eucalipto e pinus, existe uma tendência de que quanto maior a proporção madeira/aglomerante, menor tende a ser a densidade superficial de massa por resistência. No compósito produzido com as partículas de compensado, a menor densidade superficial de massa por resistência foi obtida para a proporção madeira/aglomerante de 1,86 (proporção intermediária).

Por outro lado, para os compósitos de gesso-madeira não há uma tendência a respeito do comportamento ao correlacionar a proporção madeira/aglomerante e a densidade superficial de massa por resistência. Isto porque, a densidade superficial de massa por resistência foi obtida para a proporção madeira/aglomerante de 2,00 para as partículas de compensado, 2,22 para as partículas de eucalipto e 2,50 para as partículas de pinus.

Pesquisadores (KUQO, MAI, 2021) explicam que a densidade da composição tende a influenciar significativamente suas propriedades mecânicas. Isto porque, as cargas aplicadas podem ser divididas pela área da seção transversal da amostra ensaiada. Considerando que a área da seção transversal diminui devido à presença de poros, vazios e microfissuras na estrutura interna, a carga aplicada é amplificada. Ao incorporar fibras de madeira em compósitos de gesso (KUQO, MAI, 2021), por exemplo, a carga aplicada é transmitida e distribuída entre as fibras para a matriz de gesso em um grau maior, minimizando a concentração de tensão e, eventualmente, a ocorrência de trincas. A mesma quantidade de fibras de madeira de Pinus sylvestris com tamanhos pequenos tende a contribuir para mais conexões de ponte do que fibras de ervas marinhas Posidonia oceânica (KUQO, MAI, 2021). Desta maneira, essas conexões tendem a transferir e a distribuir melhor a carga aplicada para a estrutura interna do compósito. Além da diminuição da área de seção transversal, que influencia na transferência de carga dentro da matriz de gesso, a porosidade também pode afetar a transmissão da matriz e da fibra. Isto porque, se o entorno da região da fibra é menos adensado, é possível que a aderência seja minimizada, facilitando o processo de arrancamento (KUQO, MAI, 2021).

A partir das análises e discussões realizadas, constatou-se que, dentre as proporções madeira/aglomerante utilizadas para a produção dos compósitos, foi verificada equivalência estatística ao considerar a ruptura à flexão (FIGURA 4.4-3 e FIGURA 4.4-4) tanto para os compósitos cimento-madeira como para os gesso-madeira. Para a densidade de massa endurecida (FIGURA 4.4-1 e FIGURA 4.4-2), observou-se que para os compósitos produzidos com gesso-madeira foi verificada equivalência estatística entre as proporções madeira/aglomerante de 2,22 e 2,50. Nos compósitos cimentícios, dentre as proporções
madeira/aglomerante utilizadas para a produção dos compósitos, foi verificada equivalência estatística. Ou seja, para as propriedades físicas e mecânicas consideradas, as proporções madeira/aglomerante não influenciaram significativamente os resultados e, por isso, levou-se em consideração o consumo de aglomerante (FIGURA 4.4-5 e FIGURA 4.4-6).

Conforme explicado no item 3.5.1.1, para as proporções madeira/aglomerantes de 2,0 para os compósitos cimento-madeira e 2,5 para os compósitos gesso-madeira, foram produzidas placas contendo papel *Kraft* em cada uma das faces. Os comparativos dos resultados das placas produzidas com papel *Kraft* e sem papel *Kraft* estão apresentados nas FIGURA 4.4-11 a FIGURA 4.4-20.

Na FIGURA 4.4-11 estão apresentados o comparativo dos resultados de densidade superficial de massa das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira (com ou sem papel *Kraft*) aos 28 dias. É possível observar que, de modo geral, para os compósitos cimento-madeira produzidos com as partículas de eucalipto e pinus existe uma tendência de diminuição da densidade de massa superficial para placas produzidas com papel *Kraft*. O mesmo não foi observado para os compósitos produzidos com as partículas de compensado.

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos produzidos com partículas de compensado e pinus, e entre os compósitos produzidos com eucalipto e pinus. Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (11,42 kg/m²) e pinus (12,31 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa equivalentes. Assim como, os compósitos produzidos com as partículas de eucalipto (12,58 kg/m²) e pinus (12,31 kg/m²).

Ao considerar como fator a presença do papel *Kraft* na produção da placa (com ou sem), foi obtida equivalência estatística. Ou seja, independentemente da utilização ou não do papel *Kraft* – com (11,77 kg/m²) e sem (12,44 kg/m²) –, os resultados de densidade superficial de massa tendem a ser equivalentes.



FIGURA 4.4-11 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha inferior representa o valor mínimo de densidade superficial de massa de 8,0 kg/m² de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021). A linha tracejada vermelha superior representa o valor máximo de densidade superficial de massa de 12,0 kg/m² de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

Dessa maneira, os compósitos produzidos com as partículas de compensado ou pinus, independentemente da utilização ou não do papel *Kraft* tendem a apresentar menor densidade superficial de massa. É importante destacar que as composições produzidas com as partículas de eucalipto sem papel *Kraft*, com as partículas de pinus sem papel *Kraft*, além das amostras de referência sem partículas de madeira recicladas (cimento Portland e gesso) apresentaram densidade superficial de massa superior ao limite estabelecido na NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

Na FIGURA 4.4-12 estão apresentados o comparativo dos resultados de densidade superficial de massa das placas produzidas com compósitos de gesso-madeira (com ou sem papel *Kraft*) aos 28 dias.

É possível observar que, de modo geral, para os compósitos gesso-madeira produzidos com as partículas de eucalipto e pinus existe uma tendência de diminuição da densidade de massa superficial para placas produzidas com papel *Kraft*. O mesmo não foi observado para os compósitos produzidos com as partículas de compensado.

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada diferença estatística entre os compósitos produzidos com partículas de compensado e pinus quando comparado ao produzido com eucalipto. Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (10,30 kg/m²)

e pinus (9,97 kg/m²) tendem a apresentar densidade superficial de massa superior aos compósitos produzidos com partículas de eucalipto (9,00 kg/m²).



FIGURA 4.4-12 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha inferior representa o valor mínimo de densidade superficial de massa de 8,0 kg/m² de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021). A linha tracejada vermelha superior representa o valor máximo de densidade superficial de massa de 12,0 kg/m² de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

Ao considerar como fator a presença do papel *Kraft* na produção da placa (com ou sem), foi obtida equivalência estatística. Ou seja, independentemente da utilização ou não do papel *Kraft* – com (9,45 kg/m²) e sem (10,06 kg/m²) –, os resultados de densidade superficial de massa tendem a ser equivalentes.

Dessa maneira, assim como observado para os compósitos cimentícios, os compósitos produzidos com as partículas de compensado ou pinus, independentemente da utilização ou não do papel *Kraft* tendem a apresentar menor densidade superficial de massa. É importante destacar que todas as composições produzidas com as partículas de madeira recicladas (com ou sem papel *Kraft*) apresentaram densidade superficial de massa dentro do limite estabelecido pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

Na FIGURA 4.4-13 estão apresentados o comparativo dos resultados de ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira (com ou sem papel *Kraft*) aos 28 dias. É possível observar que, de modo geral, os compósitos cimento-madeira produzidos com partículas de compensado e eucalipto tendem a apresentar maior ruptura à tração para a

placas contendo papel *Kraft*. Este comportamento não foi observado para os compósitos contendo partículas de pinus.



FIGURA 4.4-13 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha representa o valor mínimo de resistência à ruptura na flexão de 2,35 MPa (que equivale a 210 N) de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos. Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (3,13 MPa), eucalipto (3,13 MPa) e pinus (2,53 MPa) tendem a apresentar ruptura à flexão equivalentes.

Ao considerar como fator a presença do papel *Kraft* na produção da placa (com ou sem), foi obtida equivalência estatística. Ou seja, independentemente da utilização ou não do papel *Kraft* – com (3,19 MPa) e sem (2,66 MPa) –, os resultados de ruptura à flexão tendem a ser equivalentes.

É importante destacar que todas as composições produzidas (exceto a amostra de referência de cimento Portland sem papel *Kraft*) apresentaram ruptura à flexão superior ao estabelecido pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021) (2,35 MPa).

Na FIGURA 4.4-14 estão apresentados o comparativo dos resultados de ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de gesso-madeira (com ou sem papel *Kraft*) aos 28 dias. É possível observar que, de modo geral, para os compósitos gesso-madeira produzidos com partículas de compensado e eucalipto tendem a apresentar maior ruptura à tração para a

placas contendo papel *Kraft*. Este comportamento não foi observado para os compósitos contendo partículas de pinus.



FIGURA 4.4-14 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume). A linha tracejada vermelha representa o valor mínimo de resistência à ruptura na flexão de 2,35 MPa (que equivale a 210 N) de acordo com a NBR 14715-1 (ABNT, 2021).

A análise estatística indica que, ao considerar como fator o tipo de madeira (compensado, eucalipto e pinus), foi observada equivalência estatística entre os compósitos. Ou seja, os compósitos produzidos com as partículas de compensado (1,98 MPa), eucalipto (2,06 MPa) e pinus (1,83 MPa) tendem a apresentar ruptura à flexão equivalentes.

Ao considerar como fator a presença do papel *Kraft* na produção da placa (com ou sem), foi obtida diferença estatística. Ou seja, a placas produzidos com o papel *Kraft* (2,32 MPa) tendem a apresentar resultados de ruptura à flexão superiores às placas produzidas sem o papel *Kraft* (1,59 MPa).

Dessa maneira, os compósitos produzidos com o papel Kraft – independentemente do tipo de madeira – tendem a apresentar resultados de ruptura à flexão superiores às placas produzidas sem o papel *Kraft*. É importante destacar que, diferente do observado para os compósitos cimentícios, somente as composições produzidas com partículas de compensado e eucalipto (ambas com papel *Kraft*) e as amostras de referência (de cimento Portland com papel Kraft e de gesso) apresentaram ruptura à flexão superior ao estabelecido pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021) (2,35 MPa).

Considerando o ensaio de ruptura à flexão, é possível observar (FIGURA 4.4-15) que o papel *Kraft* não apresentou boa aderência aos compósitos utilizados para a produção das placas. Ainda assim, para os compósitos produzidos com gesso, a utilização do papel *Kraft* mostrou-se eficaz para o aumento da resistência.



FIGURA 4.4-15 – ENSAIO DE RUPTURA À FLEXÃO NAS PLACAS PRODUZIDAS COM PAPEL KRAFT

FONTE: A autora (2023).

Ao observar as placas produzidas com os compósitos após o ensaio de ruptura à flexão (FIGURA 4.4-16), é possível verificar que apesar da ruptura, as partículas de madeira recicladas encontram-se íntegras, indicando que a ruptura ocorre na zona de transição entre a partícula e a pasta de aglomerante, cuja aderência torna-se reduzida.

FIGURA 4.4-16 – PLACAS PRODUZIDAS COM OS COMPÓSITOS APÓS O ENSAIO DE RUPTURA À FLEXÃO CONTENDO PARTÍCULAS DE C<u>OMPENSADO (a) E EUCALIPTO (b)</u>



FONTE: A autora (2023).

Pesquisadores (JIA *et al.*, 2021) explicam que, na matriz de gesso, a influência das fibras nas propriedades mecânicas pode ser atribuída tanto ao desprendimento quanto ao arrancamento das fibras. O desprendimento ocorre durante todo o tempo, enquanto o arrancamento está relacionado à tensão de compressão interna. Isto porque, nas áreas de alta tensão da matriz, as rachaduras se desenvolvem e chegam à fibra, crescendo ao longo da interface matriz-fibra. Portanto, a energia de falha se dissipa ao longo da interface matriz-fibra, levando à descolagem e ao arrancamento da fibra, e não à fratura da fibra.

Na FIGURA 4.4-17 e FIGURA 4.4-18 estão apresentados o comparativo dos resultados do consumo de aglomerante por resistência de ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira (com ou sem papel *Kraft*) aos 28 dias.

Para os compósitos de cimento-madeira, os valores encontram-se entre 162 e 262 kg/m³/MPa. Enquanto, para os compósitos de gesso-madeira, os valores encontram-se entre 178 e 364 kg/m³/MPa.

Nas amostras de referência, ou seja, amostras produzidas sem as partículas de madeira recicladas, o consumo de cimento por resistência foi de 479 e 587 kg/m³/MPa (com e sem papel *Kraft*, respectivamente) e o de gesso foi de 330 e 198 kg/m³/MPa (com e sem papel *Kraft*, respectivamente).

Para os compósitos de cimento-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto, existe uma tendência de que placa produzidas com papel *Kraft* tendem a apresentar menor consumo de aglomerante por resistência. No compósito produzido com as partículas de pinus, o menor consumo de aglomerante por resistência foi obtido para a placa que não tinha papel *Kraft*. Comportamento similar foi observado para os compósitos produzidos com gessomadeira.



FIGURA 4.4-17 – COMPARATIVO DO RESULTADO DO CONSUMO DE AGLOMERANTE POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).





LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

Nas FIGURA 4.4-19 e FIGURA 4.4-20 estão apresentados os resultados de densidade superficial de massa por resistência de ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira (com ou sem papel *Kraft*) aos 28 dias.



FIGURA 4.4-19 – COMPARATIVO DO RESULTADO DE DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA POR RESISTÊNCIA DE RUPTURA À FLEXÃO DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA (COM OU SEM *KRAFT*)

LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).





LEGENDA: Os valores no eixo x representam as proporções madeira/aglomerante (em volume).

Para os compósitos de cimento-madeira, os valores encontram-se entre 3,0 e 4,9 kg/m²/MPa. Enquanto, para os compósitos de gesso-madeira, os valores encontram-se entre 3,4 e 7,9 kg/m²/MPa. Nas amostras de referência, ou seja, amostras produzidas sem as partículas

de madeira recicladas, a densidade superficial de massa por resistência para o cimento foi de 10,0 kg/m²/MPa, a de gesso foi de 3,5 kg/m²/MPa e a de *drywall* foi de 2,3 kg/m²/MPa.

Para os compósitos de cimento-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto, existe uma tendência de que placa produzidas com papel *Kraft* tendem a apresentar menor densidade superficial de massa por resistência. No compósito produzido com as partículas de pinus, a densidade superficial de massa por resistência foi obtida para a placa que não tinha papel *Kraft*.

Para os compósitos de gesso-madeira, as placas produzidas com os compósitos de madeira e com o papel *Kraft* tendem a apresentar menor densidade superficial de massa por resistência.

Na FIGURA 4.4-21, é possível observar que, para as placas produzidas com compósitos de gesso-madeira, no período compreendido entre a produção da placa e a realização dos ensaios aos 28 dias, ocorreu o desenvolvimento de fungos e/ou bactérias na superfície das placas.

FIGURA 4.4-21 – PLACAS PRODUZIDAS COM OS COMPÓSITOS DE GESSO COM PRESENÇA DE FUNGOS E/OU BACTÉRIAS



FONTE: A autora (2023).

Além disso, a utilização do papel *Kraft* mostrou-se eficiente apenas para a ruptura à flexão das placas produzidas com compósitos de gesso-madeira. Isso porque, para a densidade superficial de massa dos compósitos de cimento-madeira e de gesso madeira, e para a ruptura à flexão das placas cimentícias, a análise estatística indicou equivalência entre a utilização ou não do papel *Kraft*. Desta maneira, para a continuidade do estudo, a utilização do papel *Kraft* foi descartada.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que quanto maior a proporção madeira/aglomerante, menor tende a ser o consumo de aglomerante. Entretanto, as proporções madeira/aglomerante 2,0 para os compósitos cimento-madeira e 2,5 para os compósitos gesso-

madeira não apresentam viabilidade de produção devido à falta de trabalhabilidade necessária para a moldagem das placas em maiores dimensões – conforme explicado no item 4.2.1. Por isso, para a continuidade do estudo, foram utilizadas as proporções madeira/aglomerante 1,86 para os compósitos cimento-madeira e 2,22 para os compósitos gesso-madeira – conforme apresentado no item 3.5.2.

Quanto à avaliação das propriedades químicas, os difratogramas de raios-X obtidos, aos 28 dias de idade, para a pasta de cimento e para os compósitos de cimento produzidos com compensado, eucalipto e pínus, estão apresentados na FIGURA 4.4-22.

FIGURA 4.4-22 – DIFRATOGRAMAS OBTIDOS PARA A PASTA DE CIMENTO E PARA OS COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS AOS 28 DIAS DE IDADE

Pasta de cimentoCompósito cimento-madeira (comp						pensado		
Compósito cimento-madeira (eucalipto)			Compósito cimento-madeira (pinus)					
			-MM					
			-1					
CSH Et	P Et	C Et At CSH B At A	P Br B A	C Mo At A	C P Br	P Br At		
10	15 20	25 30	35 Posição (°2	40 45 2θ)	5	50	55	60

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: A = Alita (Silicato Tricálcico); B = Belita (Silicato Dicálcico); At = Aluminato Tricálcico; Br = Brownmillerita (Ferro-Aluminato Tetracálcico); Et = Etringita; P = Portlandita (Hidróxido de Cálcio); CSH = Silicato de Cálcio Hidratado; C = Calcita (Carbonato de Cálcio); Mo = Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado.

É possível observar que tanto a pasta de cimento como os compósitos produzidos com partículas de madeira recicladas apresentaram padrões com picos semelhantes, indicando que a presença das partículas de madeira recicladas e suas diferentes espécies não modificou significativamente a composição dos materiais. Pesquisadores (HON, SHIRAISHI, 2000; FAN *et al.*, 2012) explicam que nenhum pico pode ser atribuído à madeira, isto porque, esta é parcialmente cristalina – possui microfibrilas cristalinas distribuídas e regiões amorfas compostas por lignina.

Na TABELA 4.4-1 estão descritos os compostos identificados na interpretação dos difratogramas, contendo o código de referência da ficha utilizada, o nome do composto, a fórmula química, e o mineral. É importante destacar que para o composto de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) foi utilizado para a amostra de pasta de cimento e de compósito de cimento produzido com compensado o código de referência 29-0374. Entretanto, para a amostra de compósito de cimento de compósito de cimento produzido com eucalipto e com pínus foi adotado o código de referência 19-0250.

Código de Referência	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral	Símbolo		
49-0442	Silicato Tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	Alita	А		
24-0034	Silicato Dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	Belita	В		
38-1429	Aluminato Tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	-	At		
30-0226	Ferro-Aluminato Tetracálcico	2CaO · (Al, Fe)O ₃	Brownmillerita	Bt		
41-1451	Etringita	$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O$	-	Et		
44-1481	Hidróxido de Cálcio	Ca(OH) ₂	Portlandita	Р		
29-0374 / 19-0250	Silicato de Cálcio Hidratado	$9CaO \cdot 5SiO_2 \cdot xH_2O$	C-S-H	CSH		
05-0586	Carbonato de Cálcio	CaCO ₃	Calcita	С		
14-0083	Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$	-	Мо		

TABELA 4.4-1 – COMPOSTOS IDENTIFICADOS NA PASTA DE CIMENTO E NOS COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS

FONTE: A autora (2023).

A FIGURA 4.4-23 apresenta a análise comparativa no intervalo das posições $07^{\circ}2\theta$ a $12^{\circ}2\theta$ para as quatro composições de cimento-madeira estudadas aos 28 dias de idade.

É possível identificar o pico principal da Etringita em 9,1°20. Nesta posição, observase a maior intensidade do pico para a pasta de cimento e o compósito produzido com partículas de compensado quando comparado ao compósito produzido com partículas de eucalipto e, ao compósito produzido com pínus, em que não foi identificado este composto. Para a pasta de cimento e o compósito produzido com partículas de compensado foi observado, ainda, um pico de menor intensidade de Silicato de Cálcio Hidratado (CSH) sobreposto ao pico da Etringita. Apenas na pasta de cimento foi identificado o pico principal do Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado em 11,7°2θ. É importante destacar que para o intervalo de posições avaliado (07°2θ a 12°2θ) não foi identificada o pico da Etringita, do Silicato de Cálcio Hidratado e nem do Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado no compósito produzido com pínus.

FIGURA 4.4-23 – ANÁLISE COMPARATIVA NO INTERVALO DAS POSIÇÕES 07°2θ A 12°2θ PARA A PASTA DE CIMENTO E PARA OS COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS AOS 28 DIAS DE IDADE



Hidratado.

A FIGURA 4.4-24 apresenta a análise comparativa no intervalo das posições 15°2θ a 20°2θ para as quatro composições de cimento-madeira estudadas aos 28 dias de idade.

É possível identificar o pico secundário da Etringita em 15,8°20. Nesta posição, o mineral foi identificado apenas nas amostras da pasta de cimento e no compósito produzido com partículas de compensado. Assim como o Silicato Tricálcico (Alita).

Por outro lado, em todas as amostras produzidas com cimento, foi possível observar o pico secundário do Hidróxido de Cálcio (Portlandita) identificado na posição 18,0°20. É importante destacar que, nesta posição, a contagem da Etringita e da Portlandita foi inferior às amostras produzidas com compósito partículas de eucalipto e de pínus quando comparadas às amostras produzidas com pasta de cimento e com compósito produzido com partículas de compensado.

FIGURA 4.4-24 – ANÁLISE COMPARATIVA NO INTERVALO DAS POSIÇÕES 15°2θ A 20°2θ PARA A PASTA DE CIMENTO E PARA OS COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS AOS 28 DIAS DE IDADE



FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: A = Alita (Silicato Tricálcico); Et = Etringita; P = Portlandita (Hidróxido de Cálcio).

Pesquisadores (FAN *et al.*, 2012) relatam que as diferentes espécies de madeira são capazes de afetar as composições químicas dos compósitos cimento-madeira nos produtos hidratados. Outros pesquisadores (HOU *et al.*, 2022) verificaram que a adição de pó de *Masson pine* retardou significativamente o processo de hidratação do cimento Portland em compósitos.

Fan *et al.* (2012) explicam que a diminuição dos picos de Hidróxido de Cálcio (Portlandita) em compósitos de cimento-madeira podem ocorrer devido à presença dos extrativos na madeira, contribuindo para a redução do Hidróxido de Cálcio (Portlandita). Este, por sua vez, é necessário para a reação de endurecimento que transforma a Alita (Silicato Tricálcico) em Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) (HEKAL, 1996) ou o Aluminato Tricálcico em hidrato amorfo (EL-DIDAMONY *et al.*, 2001).

Neste estudo, as partículas de pinus apresentaram o maior teor de extrativos totais quando comparadas às partículas de compensado e eucalipto e, os compósitos produzidos com estas partículas, a menor intensidade dos picos de Hidróxido de Cálcio (Portlandita) e Etringita na posição 18,0°20.

Yang e Li (2022) relataram que, em compósitos cimentícios produzidos com *poplar wood* contendo aditivo acelerador de pega à base de silicato de sódio, foi verificado que a madeira apresentou efeito inibitório significativo na reação de hidratação do cimento Portland para formar Hidróxido de Cálcio (Portlandita).

A FIGURA 4.4-25 apresenta a análise comparativa no intervalo das posições 25°2θ a 35°2θ para as quatro composições de cimento-madeira estudadas aos 28 dias de idade.

FIGURA 4.4-25 – ANÁLISE COMPARATIVA NO INTERVALO DA POSIÇÃO 25°20 A 35°20 PARA A PASTA DE CIMENTO E PARA OS COMPÓSITOS DE CIMENTO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS AOS 28 DIAS DE IDADE



FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: A = Alita (Silicato Tricálcico); B = Belita (Silicato Dicálcico); At = Aluminato Tricálcico; Br = Brownmillerita (Ferro-Aluminato Tetracálcico); Et = Etringita; P = Portlandita (Hidróxido de Cálcio); CSH = Silicato de Cálcio Hidratado; C = Calcita (Carbonato de Cálcio); Mo = Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado.

Nesse intervalo podem ser observados os picos principais – podendo estar sobrepostos junto a outros – do Silicato Tricálcico (Alita) em 31,2°20, Silicato Dicálcico (Belita) em 32,7°20, Aluminato Tricálcico em 33,2°20, Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita) em 33,9°20, Hidróxido de Cálcio(Portlandita) em 34,1°20, Silicato de Cálcio Hidratado (CSH) em 28,6°20 e 27,9°20, e do Carbonato de Cálcio (Calcita) em 29,4°20.

Na posição 26,7°20, foi observada a presença do Silicato de Cálcio Hidratado (CSH) em todas as amostras. Entretanto, o Aluminato Tricálcico (At) foi verificado nas amostras de pasta de cimento e para os compósitos produzidos com partículas de eucalipto e de pínus. Na amostra produzida com partículas de compensado, foi identificada a presença do Silicato Dicálcico (Belita).

Na posição 28,7°2θ, foi identificado um pico apenas na amostra do compósito produzido com partículas de compensado (contendo o Hidróxido de Cálcio (Portlandita), a Etringita e o Silicato de Cálcio Hidratado (CSH)).

Na posição 29,5°20, foram identificados picos nas quatro amostras produzidas. Para a pasta de cimento, observou-se a presença de Silicato Tricálcico (Alita), Silicato Dicálcico (Belita), Aluminato Tricálcico (At), Etringita e Carbonato de Cálcio (Calcita). Para o compósito produzido com partículas de compensado, Carbonato de Cálcio (Calcita), Silicato Tricálcico (Alita), Aluminato Tricálcico (At) e Etringita. Para o compósito produzido com partículas de sinterais presentes na pasta de cimento, foi observada a presença do Silicato de Cálcio Hidratado (CSH). Entretanto, para o compósito produzido com

partículas de pínus, foram observados somente a presença de Silicato Tricálcico (Alita), Silicato Dicálcico (Belita), Aluminato Tricálcico (At).

Na posição 30,1°20, foi identificado um pico apenas nas amostras dos compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pínus (contendo o Silicato Tricálcico (Alita) e o Silicato de Cálcio Hidratado (CSH)).

Na posição 31,0°20, foram identificados picos nas quatro amostras produzidas. Para a pasta de cimento, observou-se a presença de Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado. Para o compósito produzido com partículas de compensado, além do Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado identificado na pasta de cimento, verificou-se a presença do Aluminato Tricálcico (At). Para os compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pínus, foi observada a presença do Silicato de Cálcio Hidratado (CSH), sendo que para o último foi identificado também a presença do Silicato Dicálcico (Belita).

Na posição 32,2°20, foram identificados picos nas quatro amostras produzidas. Para a pasta de cimento, observou-se a presença de Silicato Tricálcico (Alita), Silicato Dicálcico (Belita), Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita), Etringita e Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado. Para o compósito produzido com partículas de compensado, verificou-se a presença do Silicato Tricálcico (Alita), Silicato Dicálcico (Belita) e Aluminato Tricálcico (At). Para os compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pínus, foi observada a presença do Silicato Tricálcico (Alita), Silicato Dicálcico (Belita), Aluminato Tricálcico (At), Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita), Etringita, Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado e Silicato de Cálcio Hidratado (CSH).

Na posição 32,6°20, foi identificado um pico apenas nas amostras dos compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pínus (contendo o Silicato Tricálcico (Alita), o Silicato Dicálcico (Belita) e o Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado). Sendo que para o compósito produzido com partículas de eucalipto foi identificado também a presença de Etringita.

Na posição 33,2°20, foi identificado um pico apenas nas amostras dos compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pínus (contendo o Silicato Tricálcico (Alita), o Aluminato Tricálcico (At) e a Etringita), sendo que para o último foi identificado também a presença do Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita).

Na posição 34,0°20, foram identificados picos nas quatro amostras produzidas. Para a pasta de cimento, observou-se a presença de Silicato Tricálcico (Alita), Silicato Dicálcico (Belita), Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita) e o Hidróxido de Cálcio (Portlandita). Para o compósito produzido com partículas de compensado, verificou-se a presença do

Hidróxido de Cálcio (Potlandita), Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado e Silicato de Cálcio Hidratado (CSH), Silicato Dicálcico (Belita), Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita) e Etringita. Para os compósitos produzidos com partículas de eucalipto, foi observada a presença do Silicato Dicálcico (Belita), Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita), Etringita e Hidróxido de Cálcio (Portlandita). Por fim, para os compósitos produzidos com partículas de pínus, foi observada a presença do Ferro-Aluminato Tetracálcico (Brownmillerita), Monocarboaluminato de Cálcio Hidratado e Silicato de Cálcio Hidratado (CSH).

Na posição 34,4°20, foi identificado um pico apenas nas amostras dos compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pínus (contendo o Silicato Tricálcico (Alita), o Silicato Dicálcico (Belita) e o Hidróxido de Cálcio (Portlandita)). Sendo que para o compósito produzido com partículas de pínus foi identificado também a presença de Etringita.

Os difratogramas de raios-X obtidos, aos 28 dias de idade, para a pasta de gesso e para os compósitos de gesso produzidos com compensado, eucalipto e pínus, estão apresentados na FIGURA 4.4-26.





LEGENDA: G = Gipsita; B = Bassanita; C = Calcita.

É possível observar que tanto a pasta de gesso como os compósitos produzidos com partículas de madeira recicladas apresentaram padrões com picos semelhantes, indicando que a presença das partículas de madeira recicladas e suas diferentes espécies não modificou significativamente a composição dos materiais.

Na TABELA 4.4-2 estão descritos os compostos identificados na interpretação dos difratogramas, contendo o código de referência da ficha utilizada, o nome do composto, a fórmula química, e o mineral.

 TABELA 4.4-2 – COMPOSTOS IDENTIFICADOS NA PASTA DE GESSO E NOS COMPÓSITOS DE GESSO PRODUZIDO COM COMPENSADO, EUCALIPTO E PÍNUS

Código de Referência	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral	Símbolo		
41-0224	Sulfato de cálcio hemi-hidratado	$CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$	Bassanita	В		
33-0311	Sulfato de cálcio di-hidratado	$CaSO_4 \cdot 2 H_2O$	Gipsita	G		
05-0586	Carbonato de cálcio	CaCO ₃	Calcita	С		
EONITE: Λ output (2022)						

FONTE: A autora (2023).

A partir da interpretação dos difratogramas de raios-x (DRX) observa-se que a gipsita – sulfato de cálcio di-hidratado – possui dois picos principais. O primeiro na posição $11,6^{\circ}2\theta$ e o segundo na posição $20,7^{\circ}2\theta$.

Na FIGURA 4.4-27 é possível identificar, aos 28 dias, um dos picos principais da gipsita (11,6°2θ).





LEGENDA: G = Gesso; B = Bassanita; C = Calcita.

Nesta posição, observa-se o aumento da intensidade do pico de gesso quando comparado o compósito produzido com partículas de compensado às demais amostras.

Entretanto, ao comparar a pasta de gesso aos compósitos produzidos com partículas de eucalipto e pínus, verifica-se a diminuição da intensidade deste pico. É importante destacar que para a contagem de sulfato de cálcio di-hidratado na posição 11,6°2θ, ocorre uma redução quando comparada a quantidade obtida para o compósito produzido com compensado com o compósito produzido com pínus.

A FIGURA 4.4-28 apresenta a análise comparativa no intervalo das posições $19^{\circ}2\theta$ a $27^{\circ}2\theta$ para as quatro composições de gesso-madeira estudadas aos 28 dias de idade.





LEGENDA: G = Gesso; B = Bassanita; C = Calcita.

É possível identificar o segundo pico principal da gipsita $(20,7^{\circ}2\theta)$. Nesta posição, novamente observa-se o aumento da intensidade do pico de gesso quando comparado o compósito produzido com partículas de compensado às demais amostras. Comportamento similar é observado para a posição $23,4^{\circ}2\theta$ onde foi identificado outro pico de gesso – sulfato de cálcio di-hidratado. Ainda na posição $20,7^{\circ}2\theta$, observa-se a presença de bassanita que ocorre pela sobreposição de um pico de baixa intensidade nesta mesma posição.

Na posição $25,4^{\circ}2\theta$ foi identificado um pico de bassanita – sulfato de cálcio hemihidratado. Este mineral tende a ser identificado nas amostras não hidratadas contendo gesso (GERALDO *et al.*, 2017). Observa-se que a contagem de bassanita tende a diminuir ao comparar a pasta produzida com gesso com os compósitos produzidos com gesso e partículas de madeira recicladas, indicando que o sulfato de cálcio hemi-hidratado foi convertido em sulfato de cálcio di-hidratado. Pesquisadores (CARVALHO *et al.*, 2008) explicam que as fibras naturais são capazes de absorver e reter uma maior quantidade de água na matriz, permitindo a formação de cristais maiores ao seu redor e uma melhor aderência na matriz de gesso. Neste sentido, a diminuição do pico observada na FIGURA 4.4-28 pode ser explicada pela maior hidratação propiciada pelas partículas de madeira recicladas aos compósitos quando comparados à pasta de gesso.

A FIGURA 4.4-29 apresenta a análise comparativa no intervalo das posições $27^{\circ}2\theta$ a $37^{\circ}2\theta$ para as quatro composições de gesso-madeira estudadas aos 28 dias de idade. Nesse intervalo podem ser observados três picos com maior contagem nas posições $29,1^{\circ}2\theta$, $31,1^{\circ}2\theta$ e $33,4^{\circ}2\theta$.





LEGENDA: G = Gesso; B = Bassanita; C = Calcita.

Na posição 29,1°20 é possível que tenha ocorrido a sobreposição do pico principal da bassanita – sulfato de cálcio hemi-hidratado (29,7°20). A presença deste mineral foi identificada apenas na pasta de gesso conforme explicado anteriormente.

Ainda na posição 29,1°2 θ é possível que, também, tenha ocorrido a sobreposição do pico principal da calcita – carbonato de cálcio (29,4°2 θ). A presença deste mineral foi identificada nas amostras desenvolvidas neste estudo, exceto no compósito produzido com partículas de eucalipto.

As sobreposições dos picos de bassanita e calcita em 29,1°2θ pode ter ocorrido devido à intensidade do pico de gesso – sulfato de cálcio di-hidratado – que está localizada na posição 29,1°2θ com intensidade de 75%. É importante destacar que, para o compósito produzido com partículas de compensado, ocorreu o aumento de, aproximadamente, 28% da contagem nesta posição quando comparada à pasta de gesso. Além de não ter sido identificada a presença da bassanita.

Quanto ao pico presente na posição 31,1°20, este é característico da gipsita – sulfato de cálcio di-hidratado – com intensidade de 45%. Observa-se que apenas para o compósito produzido com partículas de pínus foi identificado, também, a presença da calcita. Entretanto, este último em menor magnitude.

Por fim, quanto ao pico presente na posição 33,4°2θ, este é característico da gipsita – sulfato de cálcio di-hidratado – com intensidade de 35%.

4.4.2. Avaliação do desempenho mecânico, acústico e térmico

4.4.2.1. Avaliação do desempenho mecânico

As placas produzidas com os compósitos de madeira foram avaliadas quanto ao desempenho mecânico, ao desempenho acústico e ao desempenho térmico. É importante destacar que não foi possível realizar a avaliação do desempenho nas placas produzidas sem partículas de madeira recicladas pois estas apresentaram trincas e fissuras significativas que impediram a realização dos mesmos (apresentado anteriormente na FIGURA 3.5-17). Desta maneira, como amostras de referência, foram consideradas somente a placa de *drywall standart* e a placa cimentícia adquiridas no comércio local.

Quanto ao desempenho mecânico, foram realizados os ensaios de resistência a impactos de corpo duro (conforme a NBR 15575-4 Anexo B (ABNT, 2021) e a NBR 11675 (ABNT, 2016)), resistência a impactos de corpo mole (conforme a NBR 11675 (ABNT, 2016)), resistência às solicitações de peças suspensas (conforme a NBR 15575-4 Anexo A (ABNT, 2021) e a NBR 11678 (ABNT, 2016)) e dureza superficial (conforme a NBR 14715-2 (ABNT, 2021)). Os ensaios foram realizados na mesma amostra e na sequência conforme descrito.

Na FIGURA 4.4-30 está apresentada a inspeção visual realizada nas placas ao término da execução do ensaio de resistência a impactos de corpo duro aos 28 dias.

Foi realizada a inspeção visual de cada uma das amostras com o objetivo de verificar a ocorrência de falhas e/ou fissuras, além de medir o diâmetro das mossas que surgiram. Observou-se que as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira, gesso-madeira e de referência (de *drywall* e cimentícia), se mantiveram intactas, sem a presença de mossas. De acordo com a NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021), os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) da edificação habitacional, com ou sem função estrutural e vedação interna, sob ação de impacto de corpo duro, para energia de impacto de 2,5 J não podem ocorrer falhas nem mossas com profundidade superior a 2,0 mm. Portanto, dentre os compósitos desenvolvidos neste estudo, todos atenderam ao nível de desempenho intermediário.

FIGURA 4.4-30 – INSPEÇÃO VISUAL REALIZADA NAS PLACAS AO TÉRMINO DA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE CORPO DURO



FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de eucalipto; [b] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de eucalipto.

Na FIGURA 4.4-31 estão apresentados os resultados de resistência a impactos de corpo mole das placas aos 28 dias. É possível observar que as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira desenvolvidos neste estudo apresentaram deslocamento transversal (num intervalo entre 15 e 22 mm) superior ao obtido para a amostra cimentícia comercial (12 mm). Comportamento similar foi observado para as placas produzidas com os compósitos gesso-madeira que apresentaram deslocamento transversal igual ou superior (num intervalo entre 20 e 32 mm) ao obtido para a amostra de *drywall* (20 mm).



FIGURA 4.4-31 – RESULTADO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE CORPO MOLE DAS PLACAS

LEGENDA: A linha tracejada vermelha representa o valor máximo de deslocamento de 4,8 mm sob ação de impacto de corpo mole de acordo com a NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021).

Considerando o tipo de madeira utilizado para a produção dos compósitos, é possível observar que as placas produzidas com os compósitos contendo as partículas de compensado, apresentaram maior deslocamento transversal quando comparadas às placas produzidas com partículas de eucalipto e pínus.

De acordo com a NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021), os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) da edificação habitacional, sem função estrutural e para vedação vertical interna constituída por elementos leves (ou seja, com densidade superficial de massa inferior a 60 kg/m²), sob ação de impacto de corpo mole, para energia de impacto de 60 J não podem ocorrer falhas e para energia de impacto de 120 J é permitida a ocorrência de deslocamento de até 4,8 mm. Portanto, dentre os compósitos desenvolvidos neste estudo, nenhum atende ao nível de desempenho mínimo.

Foi realizada, ainda, a inspeção visual de cada uma das amostras após a realização do ensaio de resistência a impactos de corpo mole com o objetivo de verificar a ocorrência de falhas e/ou fissuras. Observou-se que as placas se mantiveram intactas, exceto as placas produzidas com os compósitos gesso-madeira com partículas de compensado e com partículas de pínus (FIGURA 4.4-32).

FIGURA 4.4-32 – INSPEÇÃO VISUAL REALIZADA NAS PLACAS AO TÉRMINO DA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE CORPO MOLE



FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de compensado; [b] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de pínus.

Na FIGURA 4.4-33 estão apresentadas as correlações entre o deslocamento transversal com a densidade superficial de massa, a ruptura à flexão e o consumo de aglomerante dos compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira aos 28 dias.



FIGURA 4.4-33 - CORRELAÇÕES ENTRE O DESLOCAMENTO TRANSVERSAL COM A DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA, A RUPTURA À FLEXÃO E O CONSUMO DE AGLOMERANTE DOS

LEGENDA: Símbolos quadrados representam os compósitos de compensado, círculos de eucalipto e triângulos de pinus. A cor cinza claro representa os compósitos de gesso-madeira e a cor cinza escuro representa os compósitos de cimento-madeira.

Quanto à correlação do deslocamento transversal com a densidade superficial de massa, é possível observar que, para os compósitos de cimento-madeira, quanto menor a densidade, maior tende a ser o deslocamento. O oposto é observado, para os compósitos de gesso-madeira, isto porque, quanto maior a densidade, maior tende a ser o deslocamento.

Quanto à correlação do deslocamento transversal com a ruptura à flexão, é possível observar que, para os compósitos de cimento-madeira, quanto maior a ruptura à flexão, maior tende a ser o deslocamento. Para os compósitos de gesso-madeira, não é possível descrever uma tendência.

Quanto à correlação do deslocamento transversal com o consumo de aglomerante, não é possível descrever uma tendência quanto ao comportamento dos compósitos.

Na FIGURA 4.4-34 estão apresentados os resultados de resistência às solicitações de peças suspensas das placas aos 28 dias. É importante destacar que a carga máxima utilizada para a realização do ensaio foi de 400 N, devido à limitação do aparato para suporte de cargas. Portanto, as amostras que atingiram a carga de ruptura de 400 N, não romperam, apenas atingiram o limite do ensaio.

450 400 400 400 400 350 \mathbf{Z}^{350} 150 150 100 50 50 0 Pinus Compensado Pinus Compensado Eucalipto Eucalipto Drywall Cimentícia Cimento Gesso Referência

FIGURA 4.4-34 – RESULTADO DE RESISTÊNCIA ÀS SOLICITAÇÕES DE PEÇAS SUSPENSAS DAS PLACAS

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: A linha tracejada vermelha representa o valor mínimo de cargas de ensaio aplicadas em cada ponto de 0,4 kN sob ação de cargas devidas a peças suspensas de acordo com a NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021).

É possível observar que as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira desenvolvidos neste estudo apresentaram carga de ruptura (400 N) equivalente ao obtido para a amostra cimentícia comercial (400 N), exceto para a composição contendo partículas de pínus.

Conforme discutido anteriormente, neste estudo, as partículas de pinus apresentaram o maior teor de extrativos totais quando comparadas às partículas de compensado e eucalipto e, os compósitos produzidos com estas partículas, a menor intensidade dos picos de Hidróxido de Cálcio (Portlandita) e Etringita (FIGURA 4.4-23 e FIGURA 4.4-24). Pesquisadores explicam que a diminuição dos picos de Hidróxido de Cálcio (Portlandita) em compósitos de cimento-madeira podem ocorrer devido à presença dos extrativos na madeira, contribuindo para a redução do Hidróxido de Cálcio (Portlandita) (FAN *et al.*, 2012). Este, por sua vez, é necessário para a reação de endurecimento que transforma a Alita (Silicato Tricálcico) em Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) (HEKAL, 1996) ou o Aluminato Tricálcico em hidrato amorfo (EL-DIDAMONY *et al.*, 2001).

Para as placas produzidas com os compósitos gesso-madeira, somente a placa contendo partículas de eucalipto apresentou carga de ruptura (150 N) equivalente ao obtido para a amostra de *drywall* (150 N). Quanto as placas produzidas com compósito gesso-madeira contendo as partículas de compensado e pínus, estas apresentaram carga de ruptura de 50 N e 100 N, respectivamente. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que estas amostras sofreram danos significativos durante a realização do ensaio de resistência a impactos de corpo mole (FIGURA 4.4-32).

De acordo com a NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021), os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) da edificação habitacional, com ou sem função estrutural, sob ação de cargas devidas a peças suspensas, podem apresentar fissuras toleráveis para cargas de ensaio aplicadas em cada ponto de, no mínimo, 0,4 kN. Portanto, dentre os compósitos produzidos neste estudo, apenas os compósitos cimento-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto atendem ao nível de desempenho mínimo.

Foi realizada, ainda, a inspeção visual de cada uma das amostras após a realização do ensaio de resistência às solicitações de peças suspensas com o objetivo de verificar a ocorrência de falhas e/ou fissuras. Observou-se que as placas produzidas com o compósito de cimentomadeira com partículas de pínus (FIGURA 4.4-35d) e as placas produzidas com gesso (FIGURA 4.4-35e) (FIGURA 4.4-35f) (FIGURA 4.4-35g) (FIGURA 4.4-35h), incluindo a amostra de referência, romperam/colapsaram durante a realização do ensaio (FIGURA 4.4-35). FIGURA 4.4-35 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÀS SOLICITAÇÕES DE PEÇAS SUSPENSAS



FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: [a] Placa cimentícia; [b] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de compensado; [c] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de eucalipto; [d] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de pínus; [e] Placa de *drywall*; [f] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de compensado; [g] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de pínus; [e] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de pínus; [e] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de pínus.

Na FIGURA 4.4-36 estão apresentados os resultados de dureza superficial das placas



LEGENDA: A linha tracejada vermelha representa o valor do diâmetro máximo da mossa de 20 mm de acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021).

É possível observar que as placas produzidas com os compósitos contendo as partículas de compensado e eucalipto não apresentaram mossas após a realização do ensaio de dureza superficial, assim como, a placa cimentícia.

Por outro lado, a placa de *drywall* (FIGURA 4.4-37a) e as placas de cimento-madeira e gesso-madeira produzidas com as partículas de pínus (FIGURA 4.4-37b), apresentaram diâmetro médio da mossa de 12 mm, 15 mm e 20 mm, respectivamente.



FIGURA 4.4-37 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL

FONTE: A autora (2023). LEGENDA: [a] Placa de *drywall*; [b] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de pínus.

De acordo com a NBR 14715-2 (ABNT, 2021), que determina os requisitos para as chapas de gesso para *drywall*, a dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo da mossa de ser de no máximo 20 mm. Portanto, os compósitos desenvolvidos neste estudo atendem a este requisito.

Por fim, é possível concluir que, dentre os compósitos de cimento-madeira e gessomadeira desenvolvidos neste estudo, todos atendem ao nível de desempenho intermediário sob ação de impacto de corpo duro conforme determinado pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021). Por outro lado, considerando a ação de impacto de corpo mole, nenhum compósito desenvolvido neste estudo atende ao nível de desempenho mínimo conforme determinado pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021). Conforme explicado anteriormente, pesquisadores (ONUAGULUCHI, BANTHIA, 2016) acreditam que a influência das fibras naturais no desempenho mecânico dos compósitos, ainda é um limitante para a propagação do seu uso.

Quanto ao desempenho sob ação de cargas devidas a peças suspensas, apenas os compósitos cimento-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto atendem ao nível de desempenho mínimo conforme determinado pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021). Considerando, ainda, a dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo da mossa, dentre os compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira desenvolvidos neste estudo, todos atendem ao requisito conforme determinado pela NBR 14715-2 (ABNT, 2021).

4.4.2.2. Avaliação do desempenho acústico

Quanto ao desempenho acústico, foi determinado o índice de redução sonora (R) (*sound reduction index*) ou a perda de transmissão sonora (*sound transmission loss* – TL) de acordo com a ISO 10140-2 (ISO, 2021). A NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021) especifica que o índice de redução sonora ponderado (R_w) equivale a um valor único obtido a partir do índice de redução sonora (R) e deve ser calculado conforme especificado na ISO 10140-2 (ISO, 2021) (equações (14) e (15)). Para cada amostra foi obtido o índice de redução sonora (R) e o índice de redução sonora (R_w) numa faixa de frequência central – que variou de 100 a 3150 Hz – e alta – que variou de 4000 a 8000 Hz.

É importante destacar que a perda de transmissão sonora define a eficiência com que um painel ou uma placa é capaz de atenuar a amplitude das ondas sonoras (CHANLERT et al., 2022). De acordo com a literatura (PENG, 2017), a madeira é considerada um material poroso. Em madeiras maciças, as propriedades de absorção sonora, estão relacionadas às espécies de madeira, ao teor de umidade, à direção das fibras, entre outros fatores. Apesar disso, cabe ressaltar, que neste estudo não foi avaliada a absorção sonora, mas a perda de transmissão sonora.

Na FIGURA 4.4-38 estão apresentados os índices de redução sonora (R) das placas produzidas com compósitos cimento-madeira aos 49 dias, da amostra de referência (placa cimentícia), da curva de referência para ruído aéreo e da curva de referência para o índice de redução sonora das paredes padrão (para paredes leves) conforme descrito pela NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021).

De modo geral, é possível observar que a amostra de referência (placa cimentícia) apresentou índice de redução sonora (R) superior às amostras produzidas com os compósitos cimento-madeira desenvolvidos neste estudo. É importante destacar, também, que tanto as placas produzidas com compósitos cimento-madeira quanto a amostra de referência (placa cimentícia), apresentaram índice de redução sonora (R) inferior aos valores de referência para ruído aéreo conforme descrito pela NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021). Ao considerar os valores de referência para o índice de redução sonora das paredes padrão (para paredes leves) conforme descrito pela NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021), foi verificado que estes foram ultrapassados nas faixas de frequência de 250 a 1000 Hz para a amostra de referência (placa cimentícia) e foram ultrapassados nas faixas de frequência 500 e 630 Hz para a placa produzida com compósito cimento-madeira contendo partículas de eucalipto.



FIGURA 4.4-38 - RESULTADO DOS ÍNDICES DE REDUÇÃO SONORA (R) DAS PLACAS

Os resultados apresentados na FIGURA 4.4-38 podem ser divididos em três intervalos principais. Isto porque, para todas as amostras avaliadas, foram observadas a diminuição do índice de redução sonora (R) para as frequências de 200 e de 3150 Hz. O primeiro intervalo as frequências de 100 a 160 Hz, o segundo abrange as frequências de 200 a 2500 Hz e, o terceiro engloba as frequências de 3150 a 8000 Hz.

Para as frequências de 100 a 160 Hz, verificou-se que, apesar de todas as amostras descreverem um comportamento similar e com valores próximos, a placa produzida com o compósito de cimento-madeira contendo partículas de compensado apresentou os menores valores. Isto significa que esta amostra apresentou desempenho acústico inferior quando comparado às demais amostras avaliadas neste intervalo. Neste intervalo de frequência, o índice de redução sonora das amostras produzidas com os compósitos cimento-madeira – desenvolvidos neste estudo – variou de 12,6 dB a 21,9 dB.

Por outro lado, para as frequências de 200 a 2500 Hz, observou-se que, dentre as amostras desenvolvidas neste estudo, a placa produzida com compósito cimento-madeira contendo partículas de eucalipto apresentou valores superiores às placas contendo partículas de compensado e pínus. Isto significa que esta amostra tende a apresentar desempenho acústico superior quando comparado às demais amostras avaliadas neste intervalo. Como a densidade e a microestrutura das madeiras variam de acordo com as espécies, consequentemente, as propriedades de absorção também apresentam comportamentos diferentes de espécie para espécie. Geralmente, a propriedade de absorção sonora da madeira hardwood - representadas neste estudo pelas partículas de eucalipto - tende a ser superior quando comparada à madeira softwood - representadas neste estudo pelas partículas de pinus - de mesma densidade (PENG, 2017). Além disso, conforme apresentado anteriormente (FIGURA 4.4-1), a densidade superficial de massa obtida para as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira produzidas com as partículas de eucalipto (14,00 kg/m³) foi superior quando comparadas às placas produzidas com as partículas de compensado (12,20 kg/m³) e pinus (13,10 kg/m³). Neste intervalo de frequência, o índice de redução sonora das amostras produzidas com os compósitos cimento-madeira – desenvolvidos neste estudo – variou de 17,8 dB a 32,9 dB.

Para as frequências de 3150 a 8000 Hz, verificou-se que, dentre as amostras desenvolvidas neste estudo, a placa produzida com compósito cimento-madeira contendo partículas de eucalipto apresentou valores superiores às placas contendo partículas de compensado e pínus. Isto significa que esta amostra tende a apresentar desempenho acústico superior quando comparado às demais amostras avaliadas neste intervalo, conforme explicado

anteriormente. É importante destacar que, para a frequência de 5000 Hz, o índice de redução sonora (R) desta amostra superou, inclusive, o valor obtido para a amostra de referência (placa cimentícia). Neste intervalo de frequência, o índice de redução sonora das amostras produzidas com os compósitos cimento-madeira – desenvolvidos neste estudo – variou de 24,3 dB a 30,9 dB. Comparativamente, o índice de redução sonora para frequências de 100 Hz a 8000 Hz de amostras produzidas com fibras de banana, fibras de cânhamo, fibras de juta, fibras de coco, fibras de kenaf (KESHARWANI *et al.*, 2020) apresentaram valores entre 0,2 e 10,7 dB, 0,2 e 14,6 dB, 1,3 e 15,2 dB, 0,2 e 5,4 dB, e 1,2 e 18,5 dB, respectivamente.

Portanto, para as frequências de 200 a 2500 Hz e de 3150 Hz a 8000 Hz, observou-se que a amostra com maior densidade superficial de massa tende a apresentar desempenho acústico superior quando comparado às demais amostras. Cabe destacar que, os maiores valores foram obtidos para a frequência de 2000 Hz para a amostra de referência (35,5 dB) e para a placa produzida com compósito cimento-madeira contendo partículas de eucalipto (32,9 dB).

Pesquisadores (CHANLERT *et al.*, 2022), que produziram amostras contendo fibra de palma com adesivo de uréia-formaldeído (UF) e amostras contendo fibra de palma com adesivo de acetato de polivinila (PVAc), avaliaram a perda de transmissão sonora e observaram que quanto maior a densidade superficial de massa (kg/m³) e a densidade de massa endurecida (kg/m³), maior tende a ser a perda de transmissão sonora. Estes pesquisadores (CHANLERT *et al.*, 2022), verificaram ainda, que a perda de transmissão sonora em 5000 Hz variou de 16,0 a 37,8 dB. O mesmo comportamento foi observado por Hasan (2023) no estudo realizado com diferentes configurações e combinações utilizando painéis sanduíche e por Yang *et al.* (2019) no estudo realizado com paredes produzidas com compósito madeira-plástico. Outros pesquisadores (THAKARE *et al.*, 2019) obtiveram valores de perda de transmissão sonora entre 5,02 dB e 26,13 dB para frequências entre 100 Hz e 1600 Hz, e entre 12,84 dB e 31,28 dB para frequências entre 1000 Hz e 6300 Hz em compósitos produzidos com fibras naturais e kevlar.

Na FIGURA 4.4-39 estão destacados os índices de redução sonora ponderado (Rw) das placas produzidas com compósitos cimento-madeira aos 49 dias e da amostra de referência (placa cimentícia).



FIGURA 4.4-39 – ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA PONDERADO (Rw) DAS PLACAS PRODUZIDAS

LEGENDA: A linha tracejada vermelha representa o valor do nível de desempenho mínimo de 35 dB de acordo com a NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021).

Observou-se que, de modo geral, tanto para o valor de referência para ruído aéreo quanto para o valor de referência para o índice de redução sonora das paredes padrão (para paredes leves), as amostras de referência (placa cimentícia) apresentaram valores superiores de índice de redução sonora ponderado (Rw) quando comparadas às placas desenvolvidas neste estudo.

Por outro lado, os menores valores foram obtidos para os compósitos de cimentomadeira produzidos com as partículas de compensado. Isto significa que, dentre as amostras avaliadas, estas placas tendem a apresentar desempenho acústico inferior às demais. É importante destacar que, conforme apresentado anteriormente (FIGURA 4.4-1), a densidade superficial de massa obtida para as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira produzidas com as partículas de compensado (12,20 kg/m³) foi inferior quando comparadas às placas produzidas com as partículas de eucalipto (14,00 kg/m³) e pinus (13,10 kg/m³). Portanto, considerando o índice de redução sonora ponderado (Rw), observou-se que a amostra com menor densidade superficial de massa tende a apresentar desempenho acústico inferior quando comparado às demais amostras.

Conforme determinado pela NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021), os valores de referência para sistemas leves (Rw) para o nível de desempenho mínimo devem ser superiores a 35 dB. Entretanto, os compósitos de cimento-madeira desenvolvidos neste estudo, não

atenderam ao requisito mínimo pois apresentaram valores para sistemas leves (Rw) entre 19 e 22 dB.

Na FIGURA 4.4-40 estão apresentados os índices de redução sonora (R) das placas produzidas com compósitos gesso-madeira aos 49 dias, da amostra de referência (placa de *drywall*), da curva de referência para ruído aéreo e da curva de referência para o índice de redução sonora das paredes padrão (para paredes leves) conforme descrito pela NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021).

Pesquisadores (ZHAO *et al.*, 2010) explicam que existe uma correlação entre o efeito à prova de som e as frequências das ondas sonoras e, por isso, o mesmo material pode apresentar diferentes perdas de transmissão sonora quando diferentes frequências de onda sonora são aplicadas. De modo geral, é possível observar que a amostra de referência (placa de *drywall*) apresentou índice de redução sonora (R) superior às amostras produzidas com os compósitos gesso-madeira desenvolvidos neste estudo. É importante destacar, também, que tanto as placas produzidas com compósitos gesso-madeira quanto a amostra de referência (placa de *drywall*), apresentaram índice de redução sonora (R) inferior aos valores de referência tanto para o ruído aéreo conforme descrito pela NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021) quanto para o índice de redução sonora das paredes padrão (para paredes leves) conforme descrito pela NBR ISO 717-1 (ABNT, 2021).

FIGURA 4.4-40 – RESULTADO DOS ÍNDICES DE REDUÇÃO SONORA (R) DAS PLACAS PRODUZIDAS COM GESSO



Assim como nos compósitos cimentícios, os resultados apresentados na FIGURA 4.4-40 podem ser divididos em três intervalos principais. Isto porque, para todas as amostras avaliadas, foram observadas a diminuição do índice de redução sonora (R) para as frequências de 200 e de 3150 Hz. O primeiro intervalo as frequências de 100 a 160 Hz, o segundo abrange as frequências de 200 a 2000 Hz e, o terceiro engloba as frequências de 3150 a 8000 Hz.

Para as frequências de 100 a 160 Hz, verificou-se que, apesar de todas as amostras descreverem um comportamento similar e com valores próximos, a placa produzida com o compósito de gesso-madeira contendo partículas de pínus apresentou valores superiores às demais amostras. Isto significa que esta amostra tende a apresentar desempenho acústico superior quando comparada às demais amostras avaliadas neste intervalo. Diferentemente do observado para os compósitos cimentícios, conforme apresentado anteriormente (FIGURA 4.4-2), a densidade superficial de massa obtida para as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira produzidas com as partículas de pínus (9,80 kg/m³) foi inferior quando comparadas às placas produzidas com as partículas de compensado (11,30 kg/m³) e eucalipto (10,60 kg/m³). É importante destacar que, para a frequência de 125 Hz, o índice de redução sonora (R) da placa produzida com o compósito de gesso-madeira contendo partículas de pínus (19,9 dB) superou, inclusive, o valor obtido para a amostra de referência (placa de *drywall*) (17,8 dB). Neste intervalo de frequência, o índice de redução sonora das amostras produzidas com os compósitos gesso-madeira – desenvolvidos neste estudo – variou de 10,6 dB a 19,8 dB.

Da mesma maneira, para as frequências de 200 a 2000 Hz, observou-se que, dentre as amostras desenvolvidas neste estudo, a placa produzida com compósito gesso-madeira contendo partículas de pínus apresentou valores superiores às demais amostras. Isto significa que esta amostra, assim como para as frequências de 100 a 160 Hz, tende a apresentar desempenho acústico superior quando comparado às demais amostras avaliadas neste intervalo. Neste intervalo de frequência, o índice de redução sonora das amostras produzidas com os compósitos gesso-madeira – desenvolvidos neste estudo – variou de 15,6 dB a 29,4 dB. Assim como verificado neste estudo, pesquisadores observaram (ZHAO *et al.*, 2010) que no intervalo de 250 Hz a 1600 Hz, o valor da perda de transmissão sonora aumentou gradativamente com o aumento da frequência sonora.

Para as frequências de 3150 a 8000 Hz, verificou-se que, dentre as amostras desenvolvidas neste estudo, a placa produzida com compósito gesso-madeira contendo partículas de compensado apresentou valores inferiores às demais amostras. Isto significa que esta amostra tende a apresentar desempenho acústico inferior quando comparado às demais

amostras avaliadas neste intervalo. Considerando os resultados obtidos para a densidade superficial de massa, conforme apresentado anteriormente (FIGURA 4.4-2), as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira produzidas com as partículas de compensado (11,30 kg/m³) foi inferior quando comparadas às placas produzidas com as partículas de e eucalipto (10,60 kg/m³) e pínus (9,80 kg/m³). Neste intervalo de frequência, o índice de redução sonora das amostras produzidas com os compósitos gesso-madeira – desenvolvidos neste estudo – variou de 24,6 dB a 26,8 dB. Comparativamente, o índice de redução sonora para frequências de 100 Hz a 8000 Hz de amostras produzidas com fibras de banana, fibras de cânhamo, fibras de juta, fibras de coco, fibras de kenaf (KESHARWANI *et al.*, 2020) apresentaram valores entre 0,2 e 10,7 dB, 0,2 e 14,6 dB, 1,3 e 15,2 dB, 0,2 e 5,4 dB, e 1,2 e 18,5 dB, respectivamente.

Portanto, para as frequências de 100 Hz a 8000 Hz, diferentemente do verificado para os compósitos cimentícios, observou-se que a amostra com menor densidade superficial de massa tende a apresentar desempenho acústico superior quando comparado às demais amostras.

Cabe destacar que, os maiores valores foram obtidos para as frequências 1600 e 2000 Hz para todas as amostras avaliadas – amostra de referência (32,6 dB e 33,2 dB), placa produzida com compósito cimento-madeira contendo partículas de compensado (27,0 dB e 27,8 dB), placa produzida com compósito cimento-madeira contendo partículas de eucalipto (28,1 dB e 27,4 dB) e placa produzida com compósito cimento-madeira contendo partículas de pínus (29,4 dB e 28,9 dB).

Na FIGURA 4.4-41 estão destacados os índices de redução sonora ponderado (Rw) das placas produzidas com compósitos gesso-madeira aos 49 dias e da amostra de referência (placa de *drywall*).

Observou-se que, de modo geral, tanto para o valor de referência para ruído aéreo quanto para o valor de referência para o índice de redução sonora das paredes padrão (para paredes leves), as amostras de referência (placa de *drywall*) apresentaram valores superiores de índice de redução sonora ponderado (Rw) quando comparadas às placas desenvolvidas neste estudo.


FIGURA 4.4-41 – ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA PONDERADO (Rw) DAS PLACAS PRODUZIDAS

LEGENDA: A linha tracejada vermelha representa o valor do nível de desempenho mínimo de 35 dB de acordo com a NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021).

Observou-se que, de modo geral, tanto para o valor de referência para ruído aéreo quanto para o valor de referência para o índice de redução sonora das paredes padrão (para paredes leves), as amostras de referência (placa de *drywall*) apresentaram valores superiores de índice de redução sonora ponderado (Rw) quando comparadas às placas desenvolvidas neste estudo.

Por outro lado, os menores valores foram obtidos para os compósitos de cimentomadeira produzidos com as partículas de compensado. Isto significa que, dentre as amostras avaliadas, estas placas apresentaram desempenho acústico inferior às demais amostras, assim como nos compósitos cimentícios.

Portanto, considerando o índice de redução sonora ponderado (Rw), diferentemente do verificado para os compósitos cimentícios, observou-se que a amostra com menor densidade superficial de massa tende a apresentar desempenho acústico superior quando comparado às demais amostras.

Conforme determinado pela NBR 15575-4 Anexo F (ABNT, 2021), os valores de referência para sistemas leves (Rw) para o nível de desempenho mínimo devem ser superiores a 35 dB. Entretanto, os compósitos de gesso-madeira desenvolvidos neste estudo, não atenderam ao requisito mínimo pois apresentaram valores para sistemas leves (Rw) entre 18 e 19 dB.

Na FIGURA 4.4-42 está apresentada a correlação entre a densidade superficial de massa e o índice de redução sonora ponderado (Rw) dos compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira.



FIGURA 4.4-42 – CORRELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE SUPERFICIAL DE MASSA E O ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA PONDERADO (Rw) DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA E GESSO-

LEGENDA: Símbolos quadrados representam os compósitos de compensado, círculos de eucalipto e triângulos de pinus. A cor cinza claro representa os compósitos de gesso-madeira e a cor cinza escuro representa os compósitos de cimento-madeira.

A partir dos resultados apresentados, é possível observar comportamentos distintos para os compósitos produzidos com cimento-madeira e com gesso-madeira. De modo geral, os compósitos de gesso-madeira apresentaram densidade superficial de massa inferior aos compósitos de cimento-madeira. Este comportamento já era esperado e já foi explicado anteriormente.

Com relação às amostras produzidas com os compósitos cimento-madeira, verificouse que quanto maior a densidade de massa superficial, maior tende a ser o índice de redução sonora ponderado (Rw). Analisando, ainda, o tipo de partícula, observou-se que o melhor desempenho acústico foi obtido para os compósitos contendo as partículas de eucalipto, seguido pelas partículas de pínus e, por fim, as partículas de compensado. Esse comportamento é explicado pelo fato de que painéis produzidos com madeira tendem a apresentar maior perda de transmissão sonora para elementos com maior densidade superficial de massa (LIU *et al.*, 2000 *apud* PENG, 2017). Por outro lado, para as amostras produzidas com os compósitos gesso-madeira, verificou-se que quanto maior a densidade de massa superficial, menor tende a ser o índice de redução sonora ponderado (Rw). Analisando, ainda, o tipo de partícula, observou-se que o melhor desempenho acústico foi obtido para os compósitos contendo as partículas de pínus, seguido pelas partículas de eucalipto e, por fim, as partículas de compensado.

Pesquisadores relacionaram a perda de transmissão sonora com a característica de absorção sonora dos materiais, isto porque, as estruturas celulares têm a característica de absorção sonora (KOLYA e KANG, 2022). Além disso, outros pesquisadores afirmam que a lignina possui certa capacidade de absorção sonora (WANG *et al.*, 2016). Neste sentido, é possível explicar o comportamento dos compósitos gesso-madeira produzidos com partículas de eucalipto e pínus. A partir da TABELA 3.1-11, é possível observar que as partículas de pínus (33,57 %) apresentaram maior teor de lignina insolúvel quando comparadas às partículas de eucalipto (26,82 %). Quanto ao índice de redução sonora ponderado (Rw), o compósito contendo as partículas de pínus (27 dB) apresentou resultado superior ao compósito contendo partículas de eucalipto (26 dB).

Por fim, é possível concluir que, dentre os compósitos de cimento-madeira e gessomadeira desenvolvidos neste estudo, nenhum atende ao nível de desempenho mínimo conforme determinado pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021). É importante destacar que os ensaios foram realizados apenas com uma placa por amostra, ou seja, não configurando um sistema de vedação.

4.4.2.3. Avaliação do desempenho térmico

Quanto ao desempenho térmico, este foi determinado de forma qualitativa seguindo um procedimento experimental (FRANZEN, 2015). Para cada amostra, foram avaliadas a temperatura mínima, a máxima e a média obtida a partir das imagens para cada tempo aos 98 dias. Além disso, foi obtida, também, a temperatura no ponto central de cada amostra.

Na

FIGURA 4.4-43 está apresentada a variação da temperatura durante 100 minutos obtida no ponto central das placas produzidas com cimento aos 98 dias. Os resultados representam a variação da temperatura entre o início do ensaio (período 0 minutos) e o final do ensaio (período 100 minutos) com a temperatura oscilando entre 75°C e 85°C (conforme explicado no item 3.5.2.2 e FIGURA 3.5-15).



É possível observar que, quando comparado ao período de 0 minutos, todas as amostras apresentaram aumento gradual da temperatura, apesar de manifestarem diferentes comportamentos.

Quanto à amostra de referência – placa cimentícia – foi observada a ocorrência de dois platôs. O primeiro, compreendido no intervalo entre 30 e 40 minutos, e o segundo no intervalo entre 70 e 90 minutos. Como não há uma explicação para este comportamento, o ensaio foi realizado novamente em outra amostra de placa cimentícia, e o mesmo comportamento foi observado. Ainda assim, por se tratar de uma amostra comercial, não há informações detalhadas acerca de sua composição ou informações que contribuam para explicar este comportamento. É importante destacar, ainda, que a espessura da amostra de referência era de 10 mm, enquanto para as placas desenvolvidas neste estudo, a espessura era de 12,5 mm.

Comparando os resultados da amostra de referência com os das placas desenvolvidas neste estudo – contendo partículas de compensado, eucalipto e pínus – foi observado que, no intervalo que compreende de 0 a 40 minutos, estas apresentaram maior ganho de temperatura quando comparadas à amostra de referência. A partir dos 50 minutos, esta tendência é alterada e a amostra de referência passou a apresentar maior ganho de temperatura até o término do ensaio. Isto indica que, para períodos de exposição entre 50 e 100 minutos, as placas de cimentomadeira desenvolvidas tendem a apresentar maior isolamento térmico quando comparada à amostra de referência.

Quanto às placas desenvolvidas – contendo partículas de compensado, eucalipto e pínus – foi observado que, de maneira geral, estas apresentaram maior ganho de temperatura no intervalo que compreende de 0 a 80 minutos, a placa produzida com partículas de pínus apresentou maior ganho de temperatura quando comparada às placas produzidas com partículas de compensado e eucalipto.

Dentre as placas desenvolvidas – contendo partículas de compensado, eucalipto e pínus – foi observado que, de maneira geral, o menor ganho de temperatura foi obtido para a placa produzida com partículas de compensado. Esta, por sua vez, apresentou menor densidade superficial de massa (12,17 kg/m²), quando compara às placas produzidas com partículas de eucalipto (14,01 kg/m²) e pínus (13,10 kg/m²). Pesquisadores (Ferreira *et al.*, 2016) explicam que, materiais com menor densidade tendem a apresentar melhores propriedades térmicas. Além disso, a estrutura porosa da madeira tende a dificultar a transferência de calor (LIN *et al.*, 2022).

No estudo realizado com palha de arroz e aglomerantes naturais – como alginato de sódio e quitosana – pesquisadores (Zhou *et al.*, 2023) explicaram que a maior proporção de aglomerante presente na composição tende a contribuir para o aumento da condutividade térmica. Entretanto, neste estudo, os consumos de aglomerante foram similares – 647,92 kg/m³ para compósitos produzidos com partículas de compensado, 650,50 kg/m³ para compósitos produzidos com partículas de eucalipto, 650,75 kg/m³ para compósitos produzidos com partículas de pínus – não apresentando influência no desempenho térmico das placas produzidas.

Na FIGURA 4.4-44 estão apresentadas as imagens térmicas obtidas no intervalo de 0 a 100 minutos da parte central das placas produzidas com cimento aos 98 dias. A tonalidade das cores na imagem representa a temperatura na superfície das placas. Quanto maior a temperatura, mais quente é a tonalidade da cor.



FIGURA 4.4-44 – IMAGENS TÉRMICAS OBTIDAS NO INTERVALO DE 0 A 100 MINUTOS DAS ______PLACAS PRODUZIDAS COM CIMENTO



FONTE: A autora (2023)

LEGENDA: [a] Placa cimentícia; [b] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de compensado; [c] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de eucalipto; [d] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de pínus; [0] Tempo 0 minutos; [10] Tempo 10 minutos; [20] Tempo 20 minutos; [30] Tempo 30 minutos; [40] Tempo 40 minutos; [50] Tempo 50 minutos; [60] Tempo 60 minutos; [70] Tempo 70 minutos; [80] Tempo 80 minutos; [90] Tempo 90 minutos; [100] Tempo 100 minutos.

Quando considerada as diferentes composições das placas, observam-se comportamentos distintos para a placa cimentícia (FIGURA 4.4-44a) e as placas produzidas com compósitos cimento-madeira contendo partículas de compensado (FIGURA 4.4-44b), eucalipto (FIGURA 4.4-44c) e pínus (FIGURA 4.4-44d).

No período compreendido entre 0 minutos e 40 minutos, é possível observar a heterogeneidade da distribuição da temperatura nas placas produzidas com compósitos cimento-madeira contendo partículas de compensado (FIGURA 4.4-44b), eucalipto (FIGURA 4.4-44c) e pínus (FIGURA 4.4-44d). Diferente do observado para a placa cimentícia que, após 10 minutos, já apresenta distribuição uniforme da temperatura (FIGURA 4.4-44a).

No período compreendido entre 50 minutos e 100 minutos, é possível observar uma distribuição uniforme da temperatura, inclusive nas placas produzidas com compósitos

cimento-madeira contendo partículas de compensado (FIGURA 4.4-44b), eucalipto (FIGURA 4.4-44c) e pínus (FIGURA 4.4-44d).

Pesquisadores (Zhang *et al.*, 2021) explicam que o desempenho referente ao isolamento térmico pode ser influenciado pelos materiais utilizados para a fixação das placas. Isto porque, utilizar vigas de pínus (Zhang *et al.*, 2021) foi obtido um melhor desempenho quando comparado às paredes instaladas em estruturas de aço leve. O aço é conhecido como um excelente condutor térmico, não favorecendo o isolamento e, ao contribuir como ponte térmica, resultam no baixo isolamento térmico (Zhang *et al.*, 2021). Neste estudo, foi utilizada a estrutura em aço leve para a fixação de todas as amostras ensaiadas.

Na FIGURA 4.4-45 estão apresentadas as temperaturas mínima, máxima e média durante 100 minutos obtidas na parte central das placas produzidas com cimento aos 98 dias.

Quanto às temperaturas máximas e mínimas, observa-se que, de modo geral, a menor amplitude térmica foi obtida para a placa cimentícia quando comparada às placas produzidas com os compósitos cimento-madeira desenvolvidos neste estudo. Exceto para o período de 60 minutos em que foi verificada uma amplitude térmica de 82,7°C. A amplitude térmica obtida para as placas produzidas com compósitos indica que estas apresentam heterogeneidade quanto à distribuição do calor na placa.

Quanto ao tipo de partícula presente nos compósitos cimento-madeira, observou-se que a diferença entre as temperaturas máximas obtidas ao longo do período de 100 minutos foi de 42,4°C, 46,4°C e 32,3°C, para a placa produzida com partículas de compensado, com partículas de eucalipto e com partículas de pínus, respectivamente. Isto indica que as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira com partículas de pínus apresentaram menor variação da temperatura máxima ao longo do período de 100 minutos.

É importante destacar, ainda, que a temperatura máxima obtida para as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira desenvolvidos neste estudo foi de 102,3 °C, 100,5 °C e 84,5 °C aos 100 minutos, para a placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de compensado, com partículas de eucalipto e com partículas de pínus, respectivamente. Isto indica que as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira com partículas de pínus absorveram menos calor ao longo do período de 100 minutos.

Quanto às temperaturas médias, observa-se que, ao longo do período de 100 minutos, o desvio-padrão da temperatura média foi de 7,32°C, 4,80°C, 4,23°C e 4,10°C, para a placa cimentícia, para a placa com partículas de compensado, para a placa com partículas de eucalipto e para a placa com partículas de pínus, respectivamente. Isto indica que as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira desenvolvidos neste estudo apresentaram menor variação da temperatura média ao longo do período de 100 minutos.



FIGURA 4.4-45 – TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM CIMENTO

LEGENDA: [a] Placa cimentícia; [b] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de compensado; [c] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de eucalipto; [d] Placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de pínus.

Vale ressaltar que, a natureza anisotrópica da madeira, pode contribuir para os diferentes comportamentos relacionados à transferência de calor em decorrência da posição das partículas de madeira recicladas, estejam elas na direção transversal, longitudinal ou radial, por

exemplo (LIN *et al.*, 2022). Neste estudo, os compósitos produzidos apresentaram uma distribuição heterogênea das partículas de madeira recicladas, o que pode influenciar na variabilidade dos resultados.

Na FIGURA 4.4-46 está apresentada a variação da temperatura durante 60 minutos obtida no ponto central das placas produzidas com gesso aos 98 dias. Os resultados representam a variação da temperatura entre o início do ensaio (período 0 minutos) e o final do ensaio (período 60 minutos) com a temperatura oscilando entre 75°C e 85°C (conforme explicado no item 3.5.2.2 e FIGURA 3.5-15).



É possível observar que, assim como nos compósitos cimentícios, quando comparado ao período de 0 minutos, todas as amostras apresentaram aumento gradual da temperatura, apesar de manifestarem diferentes comportamentos.

Quanto à amostra de referência – placa de *drywall* – foi observada a ocorrência de dois platôs. O primeiro, compreendido no intervalo entre 10 e 20 minutos, e o segundo aos 50 minutos. Por se tratar de uma amostra comercial, assim como para a placa cimentícia, não há informações detalhadas acerca de sua composição ou informações que contribuam para explicar este comportamento.

Comparando os resultados da amostra de referência com os das placas desenvolvidas neste estudo – contendo partículas de compensado, eucalipto e pínus – foi observado que, no intervalo que compreende de 0 a 40 minutos, estas apresentaram menor ganho de temperatura quando comparadas à amostra de referência. A partir dos 50 minutos, a placa produzida com as partículas de pínus, passou a apresentar maior ganho de temperatura, quando comparada às demais amostras, até o término do ensaio. Isto indica que, para períodos de exposição entre 0 e 40 minutos, as placas de gesso-madeira desenvolvidas tendem a apresentar maior isolamento térmico quando comparada à amostra de referência. Isto porque, a estrutura porosa da madeira tende a dificultar a transferência de calor (LIN *et al.*, 2022). Vale destacar que a placa produzida com compósito gesso-madeira contendo partículas de eucalipto, apresentou o melhor desempenho térmico, pois desenvolveu o menor ganho de temperatura no intervalo compreendido entre 20 e 60 minutos.

Dentre as placas desenvolvidas – contendo partículas de compensado, eucalipto e pínus – foi observado que, de maneira geral, o menor ganho de temperatura foi obtido para a placa produzida com partículas de eucalipto, conforme explicado anteriormente. Esta, por sua vez, apresentou menor densidade superficial de massa (10,59 kg/m²), quando compara às placas produzidas com partículas de compensado (11,27 kg/m²) e pínus (9,82 kg/m²). Pesquisadores (Ferreira *et al.*, 2016) explicam que, materiais com menor densidade tendem a apresentar melhores propriedades térmicas. Entretanto, neste estudo, para os compósitos gesso-madeira, a densidade superficial de massa não apresentou influência no desempenho térmico das placas produzidas.

Pesquisadores (Zhou *et al.*, 2023) explicam que a maior proporção de aglomerante presente na composição tende a contribuir para o aumento da condutividade térmica. Entretanto, neste estudo, os consumos de aglomerante foram similares – 502,08 kg/m³ para compósitos produzidos com partículas de compensado, 504,27 kg/m³ para compósitos produzidos com partículas de eucalipto, 504,39 kg/m³ para compósitos produzidos com partículas de pínus – não apresentando influência no desempenho térmico das placas produzidas, assim como nos compósitos cimentícios.

Na FIGURA 4.4-47 estão apresentadas as imagens térmicas obtidas no intervalo de 0 a 100 minutos da parte central das placas produzidas com gesso aos 98 dias. A tonalidade das cores na imagem representa a temperatura na superfície das placas. Quanto maior a temperatura, mais quente é a tonalidade da cor.



FIGURA 4.4-47 – IMAGENS TÉRMICAS OBTIDAS NO INTERVALO DE 0 A 60 MINUTOS DAS PLACAS PRODUZIDAS COM GESSO

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: [a] Placa de *drywall*; [b] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de compensado; [c] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de eucalipto; [d] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de pínus; [0] Tempo 0 minutos; [10] Tempo 10 minutos; [20]

Quando considerada as diferentes composições das placas, observam-se comportamentos distintos para a placa de *drywall* (FIGURA 4.4-47a) e as placas produzidas com compósitos gesso-madeira contendo partículas de compensado (FIGURA 4.4-47b), eucalipto (FIGURA 4.4-47c) e pínus FIGURA 4.4-47d).

No período compreendido entre 0 minutos e 20 minutos, é possível observar a heterogeneidade da distribuição da temperatura nas placas produzidas com compósitos gessomadeira contendo partículas de compensado (FIGURA 4.4-47b), eucalipto (FIGURA 4.4-47c) e pínus (FIGURA 4.4-47d). Diferente do observado para a placa de *drywall* que, após 10 minutos, já apresenta distribuição uniforme da temperatura (FIGURA 4.4-47a).

No período compreendido entre 30 minutos e 60 minutos, é possível observar uma distribuição uniforme da temperatura, inclusive nas placas produzidas com compósitos gessomadeira contendo partículas de compensado (FIGURA 4.4-47b), eucalipto (FIGURA 4.4-47c) e pínus (FIGURA 4.4-47d).

Pesquisadores (Zhang *et al.*, 2021) explicam que o desempenho referente ao isolamento térmico pode ser influenciado pelos materiais utilizados para a fixação das placas. Isto porque, utilizar vigas de pine foi obtido um melhor desempenho quando comparado às paredes instaladas em estruturas de aço leve. O aço é conhecido como um excelente condutor térmico, não favorecendo o isolamento e, ao contribuir como ponte térmica, resultam no baixo isolamento térmico (Zhang *et al.*, 2021). Neste estudo, assim como nos compósitos cimentícios, foi utilizada a estrutura em aço leve para a fixação de todas as amostras ensaiadas.

Na FIGURA 4.4-48 estão apresentadas as temperaturas mínima, máxima e média durante 60 minutos obtidas na parte central das placas produzidas com gesso aos 98 dias.

Quanto às temperaturas máximas e mínimas, observa-se que, de modo geral, a maior amplitude térmica foi obtida para a placa produzida compósito cimento-madeira com partículas de compensado. A maior amplitude térmica indica que esta apresenta heterogeneidade quanto à distribuição do calor na placa.

Quanto ao tipo de partícula presente nos compósitos gesso-madeira, observou-se que a diferença entre as temperaturas máximas obtidas ao longo do período de 60 minutos foi de 30,6°C, 26,4°C e 32,6°C, para a placa produzida com partículas de compensado, com partículas de eucalipto e com partículas de pínus, respectivamente. Isto indica que as placas produzidas

com os compósitos cimento-madeira com partículas de eucalipto apresentaram menor variação da temperatura máxima ao longo do período de 60 minutos.



FIGURA 4.4-48 – TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA DAS PLACAS PRODUZIDAS COM GESSO

LEGENDA: [a] Placa de *drywall*; [b] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de compensado; [c] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de eucalipto; [d] Placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de pínus.

É importante destacar, ainda, que a temperatura máxima obtida para as placas produzidas com os compósitos gesso-madeira desenvolvidos neste estudo foi de 83,3 °C, 66,1 °C e 58,0°C aos 60 minutos, para a placa produzida com compósito cimento-madeira com partículas de compensado, com partículas de eucalipto e com partículas de pínus, respectivamente. Isto indica que as placas produzidas com os compósitos cimento-madeira com partículas de pínus absorveram menos calor ao longo do período de 60 minutos.

Quanto às temperaturas médias, observa-se que, ao longo do período de 60 minutos, o desvio-padrão da temperatura média foi de 2,95°C, 4,46°C, 2,26°C e 3,19°C, para a placa de *drywall*, para a placa com partículas de compensado, para a placa com partículas de eucalipto e para a placa com partículas de pínus, respectivamente. Isto indica que as placas produzidas com os compósitos gesso-madeira com partículas de eucalipto desenvolvidos neste estudo apresentaram menor variação da temperatura média ao longo do período de 60 minutos.

Vale ressaltar que, a natureza anisotrópica da madeira, pode contribuir para os diferentes comportamentos relacionados à transferência de calor em decorrência da posição das partículas de madeira recicladas, estejam elas na direção transversal, longitudinal ou radial, por exemplo (LIN *et al.*, 2022). Neste estudo, assim como nos compósitos cimentícios, os compósitos produzidos apresentaram uma distribuição heterogênea das partículas de madeira recicladas, o que pode influenciar na variabilidade dos resultados.

Por fim, é possível concluir que as placas produzidas com compósitos cimentomadeira contendo partículas de compensado, eucalipto e pínus, apresentaram isolamento térmico superior à amostra de referência (placa cimentícia) para exposições superiores a 50 minutos. Para as placas produzidas com compósitos gesso-madeira contendo partículas de compensado, eucalipto e pínus, foi obtido isolamento térmico superior à amostra de referência (placa de *drywall*) para exposições compreendidas no intervalo de 0 a 40 minutos. Entretanto, as placas produzidas com compósito gesso-madeira contendo partículas de eucalipto, apresentaram isolamento térmico superior às demais amostras para exposições entre 0 e 60 minutos. É importante destacar, novamente, que os ensaios foram realizados apenas com uma placa por amostra, ou seja, não configurando um sistema de vedação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

5.1.1 Estudo da influência da distribuição granulométrica das partículas de madeira recicladas em compósitos

Ao verificar a influência das composições granulométricas das partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades dos compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira, com base nos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Observou-se que as partículas de pínus apresentaram maior área superficial conforme a diminuição da granulometria e maior teor de extrativos totais. Os resultados de massa unitária seca das partículas indicam que, para dosagens realizadas em massa, ocorre uma diminuição no volume de madeira presente nos traços produzidos com as partículas moídas três vezes (CG03) quando comparada às partículas moídas apenas uma vez (CG01) e as partículas passantes na peneira 1,2 mm (CGP1,2).
- Nos compósitos de cimento-madeira, o aditivo acelerador de pega utilizado mostrou-se eficiente para diminuir o tempo de início de pega dos compósitos produzidos com partículas de madeira recicladas quando comparados às amostras de referência.
- Os resultados de resistência apresentaram diferentes comportamentos, principalmente, de acordo com o tipo de madeira (de compensado, de eucalipto ou de pínus) utilizado para a produção dos compósitos. De modo geral, os compósitos de cimento-madeira produzidos com a composição granulométrica CG03, ou com as partículas de compensado, ou com a proporção de 11% tendem a apresentar maior resistência à tração na flexão quando comparados aos demais compósitos produzidos neste estudo. Enquanto os compósitos de cimento-madeira produzidos neste estudo. Enquanto os compósitos de cimento-madeira produzidos com as composições CGP1,2, ou com compensado, ou com a proporção 7,5% tendem a apresentar os maiores valores de resistência à compressão. Já os compósitos de gesso-madeira, os compósitos produzidos com a composições com as partículas de

eucalipto, ou com a proporção de 7,5% tendem a apresentar maior resistência à tração na flexão e à compressão.

- Quanto à correlação da massa unitária seca com a densidade de massa endurecida, para os três tipos de madeira, observa-se que existe uma tendência de aumento da densidade com o aumento da massa unitária das partículas.
- 5.1.2 Estudo da influência do aditivo superplastificante em compósitos com partículas de madeira recicladas

Ao verificar a influência do aditivo superplastificante em compósitos com partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira, com base nos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Observou-se que o aumento da proporção madeira/aglomerante contribuiu para a diminuição do índice de consistência e para a diminuição da densidade de massa fresca.
- Os resultados de resistência indicam que compósitos de cimento-madeira produzidos com partículas de compensado ou com a proporção madeira/aglomerante 2,0 tendem a apresentar maior resistência à tração na flexão, e quando produzidos com as partículas de compensado ou os com a proporção madeira/aglomerante 0,0 (amostra de referência), tendem a apresentar maior resistência à compressão. Enquanto para os compósitos gesso-madeira, independentemente do tipo de madeira, quanto menor a proporção madeira/aglomerante utilizada para a produção do compósito, maior tende a ser a resistência à tração na flexão e à compressão.

5.1.3 Estudo do empacotamento das partículas de madeira recicladas

Ao avaliar o empacotamento das partículas de madeira recicladas de resíduos de construção e demolição (RCD), com base nos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

 Após a comparação das composições granulométricas das partículas de madeira recicladas com as composições granulométricas recomendadas pelos modelos de empacotamento de partículas, pode-se observar que a composição de partículas ideal aumentou a densidade de empacotamento do conjunto granular para todos os tipos de madeira. Isso indica que, apesar das diferenças significativas entre os agregados minerais usados para concretos e partículas de madeira recicladas, as composições granulométricas da literatura provaram ser uma ferramenta eficaz para a dosagem de compósitos de aglomerantes inorgânicos e madeira. Como a densidade de empacotamento é aumentada ao utilizar os modelos, a concentração de sólidos dos conjuntos granulares é maior e, por isso, o menor volume de vazios exigirá uma menor quantidade de aglomerante para a produção dos compósitos.

- A partir da comparação dos resultados experimentais com o modelo CPM, foi possível constatar que o modelo subestimou os valores de densidade de empacotamento em todos os casos. Também não foi possível esclarecer o comportamento da densidade de empacotamento para as partículas de eucalipto, uma vez que os resultados experimentais mostraram uma tendência diferente quando comparados aos resultados teóricos. Isso indica que algumas adaptações devem ser realizadas nos parâmetros usados para o cálculo ao aplicar o CPM às partículas de madeira recicladas, principalmente o valor de K. Isso era esperado, pois os parâmetros do CPM são todos propostos com base em experimentos realizados com agregados minerais, que diferem muito das partículas de madeira recicladas em características morfológicas.
- Considerando os três tipos de madeira estudados, os experimentos indicaram que os maiores valores de densidade de empacotamento foram obtidos para as partículas de pinus, seguido das partículas de eucalipto e compensado. Observou-se que as partículas de pinus apresentaram as maiores densidades de empacotamento devido à maior densidade de empacotamento individual de cada classe. Além disso, outros pesquisadores (TANNOUS *et al.* 2013) também observaram as partículas de madeira macia representada neste estudo pelas partículas de pinus resultaram em maior densidade de empacotamento do que para partículas de madeira dura representada neste estudo pelas partículas de eucalipto. O mecanismo de fratura da madeira durante a fresagem, que é característico de cada espécie de madeira, pode causar esse comportamento (MASCHE *et al.* 2019). Pesquisadores (VASIC e STANZL-

TSCHEGG, 2007) mostraram que *Pinus spp*. tem uma resposta de fratura mais dúctil do que *Eucalyptus spp*. e, por isso, que é mais provável que quebre durante o estresse. Por fim, o compensado é produzido a partir de finas camadas de madeira unidas umas às outras usando resinas fenólicas (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2010; FOREST PRODUCTS LABORATORY 2010). Este fato contribuiu para alterar o comportamento das partículas de madeira, uma vez que o compensado também é composto por uma madeira macia.

- Um desafio é gerar composições granulométricas próximas às curvas do modelo ideal. Neste estudo, isso foi feito peneirando e separando as classes granulométricas e misturando-as novamente, de acordo com as quantidades indicadas pelos modelos. Entretanto, esse procedimento é inviável de ser reproduzido em larga escala, o que limita sua aplicação. É importante destacar que a composição granulométrica original de cada tipo de madeira depende tanto do tempo de fresagem quanto dos parâmetros de fresagem, como martelo ou facas, velocidade de rotação, tipo e diâmetro das grades, por exemplo. Assim, um estudo sobre como ajustar esses parâmetros para atingir as curvas das composições granulométricas dos modelos de empacotamento de partículas recomendadas pela literatura, especialmente a do modelo de Alfred que resultou na maior densidade de empacotamento em experimentos com todos os tipos de madeira –, seria útil para reproduzir esta condição ideal em larga escala e aplicações industriais.
- Foram determinadas as quantidades de cada tipo de material necessárias para obter os conjuntos com menor (q = 0,21) e maior (q = 0,37) densidade de empacotamento a partir do modelo de Alfred, bem como a proporção madeira/aglomerante (em volume) do respectivo conjunto. Observou-se que, adotando q = 0,21 somente os conjuntos binários apresentaram viabilidade de produção em decorrência da trabalhabilidade. Desta maneira, os conjuntos ternários e os conjuntos obtidos adotando q = 0,37 foram desconsideradas para a continuidade do estudo, por não apresentarem viabilidade de produção.
- 5.1.4 Estudo do desempenho de placas de vedação vertical interna

Ao verificar o desempenho das placas de vedação verticais internas produzidas com os compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira, com base nos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Todos os compósitos produzidos com gesso e partículas de madeira recicladas apresentaram densidade superficial de massa dentro dos limites da NBR 14715-1 (ABNT, 2021). Além disso, todos os compósitos produzidos com cimento e partículas de madeira recicladas apresentaram ruptura à flexão superior ao estabelecido pela NBR 14715-1 (ABNT, 2021).
- A utilização do papel *Kraft* mostrou-se eficiente apenas para a ruptura à tração das placas produzidas com compósitos de gesso-madeira. Entretanto, em decorrência do desenvolvimento de fungos e/ou bactérias na superfície das placas, a utilização do papel *Kraft* para a continuidade do estudo foi descartada.
- A interpretação dos difratogramas de DRX demonstrou que a presença das partículas de madeira recicladas e suas diferentes espécies não modificou significativamente a composição dos materiais. Entretanto, para os compósitos de cimento-madeira, a presença das partículas de eucalipto e pinus contribuiu para a diminuição dos picos principal (em 9,1°2θ) e secundário (em 15,8°2θ) da Etringita. Para os compósitos de gesso-madeira, a presença das partículas de eucalipto e pinus contribuiu para a diminuição dos picos de gesso-madeira, a presença das partículas de eucalipto e pinus contribuiu para a diminuição do pico de sulfato de cálcio di-hidratado (em 11,6°2θ).
- Verificou-se todos os compósitos desenvolvidos atendem ao nível de desempenho intermediário sob ação de impacto de corpo duro. Por outro lado, nenhum atendeu ao nível de desempenho mínimo para a ação de impacto de corpo mole. Além disso, as placas produzidas com os compósitos contendo as partículas de compensado, apresentaram maior deslocamento transversal quando comparadas às placas produzidas com partículas de eucalipto e pínus.
- Verificou-se, também, que apenas os compósitos cimento-madeira produzidos com as partículas de compensado e eucalipto atendem ao nível de desempenho mínimo sob ação de cargas devidas a peças suspensas. Considerando, ainda, a dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo da mossa, todos atendem ao requisito da norma.
- Quanto ao desempenho acústico, observou-se que as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira, desenvolvidas neste

estudo, não atenderam ao requisito mínimo. Isto porque, apresentaram valores para sistemas leves (Rw) entre 18 e 22 dB cujo nível de desempenho mínimo deve ser superior a 35 dB. É importante destacar que os ensaios foram realizados apenas com uma placa por amostra, ou seja, não configurando um sistema de vedação.

- Para as placas produzidas com compósitos de cimento-madeira, verificou-se que quanto maior a densidade de massa superficial, maior tende a ser o índice de redução sonora ponderado (Rw). Analisando, ainda, o tipo de partícula, observou-se que o melhor desempenho acústico foi obtido para os compósitos contendo as partículas de eucalipto, seguido pelas partículas de pínus e, por fim, as partículas de compensado. Por outro lado, para as placas produzidas com compósitos de gesso-madeira, verificou-se que quanto maior a densidade de massa superficial, menor tende a ser o índice de redução sonora ponderado (Rw). Analisando, ainda, o tipo de partícula, observou-se que o melhor desempenho acústico foi obtido para os compósitos contendo as partículas de pínus, seguido pelas partículas de eucalipto e, por fim, as partículas de pínus, seguido pelas partículas de eucalipto e, por fim, as partículas de compensado.
- Quanto ao desempenho térmico, observou-se que as placas produzidas com compósitos de cimento-madeira desenvolvidas neste estudo apresentaram isolamento térmico superior à amostra de referência (placa cimentícia) para exposições superiores a 50 minutos. Para as placas produzidas com compósitos de gesso-madeira desenvolvidas neste estudo, foi obtido isolamento térmico superior à amostra de referência (placa de *drywall*) para exposições compreendidas no intervalo de 0 a 40 minutos. É importante destacar, também, que os ensaios foram realizados apenas com uma placa por amostra, ou seja, não configurando um sistema de vedação.

5.2. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A partir do estudo desenvolvido e das limitações observadas, são sugeridas pesquisas complementares com o intuito de contribuir para o avanço do conhecimento referente ao tema abordado:

 Desenvolver compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira contendo partículas de madeira recicladas de resíduos de outros setores industriais;

- Desenvolver compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira contendo partículas de madeira recicladas de outras espécies;
- Realizar a moagem das partículas de madeira recicladas em outros tipos de equipamentos e/ou moinhos para avaliar a influência na forma das partículas;
- Desenvolver compósitos de madeira contendo outros aglomerantes, como a cal;
- Desenvolver compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira com outros teores e tipos de superplastificante, em especial teores acima do recomendado pelo fabricante;
- Desenvolver compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira com diferentes aditivos químicos, como incorporador de ar;
- Desenvolver compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira para a produção de placas contendo outros tipos de papel na superfície;
- Desenvolver compósitos de cimento-madeira e gesso-madeira para a produção de placas utilizadas em outras aplicações, tais como forros e áreas externas e/ou molhadas;
- Avaliar o desempenho de placas produzidas com compósito de cimentomadeira e de gesso-madeira como um sistema – com duas placas – e contendo material para isolamento térmico e acústico;
- Avaliar o desempenho de placas produzidas com compósito de cimentomadeira e de gesso-madeira como um sistema – com duas placas – sendo uma placa produzida com compósito gesso-madeira com partículas de compensado, e a outra com compósito gesso-madeira com partículas de pinus, por exemplo;
- Avaliar a viabilidade econômica da produção e uso das partículas de madeira recicladas em compósitos aglomerante-madeira, considerando os requisitos técnicos necessários.

5.3. ARTIGOS DESENVOLVIDOS AO LONGO DESTE ESTUDO

A partir do estudo desenvolvido e do período de realização do doutorado, foram realizadas pesquisas complementares que resultaram na publicação dos seguintes artigos em periódicos:

- ROCHA, T. M. S.; CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MIRANDA, L. F. R. Study of particle packing of plywood, *Eucalyptus spp.* and *Pinus spp.* from construction and demolition waste. European Journal of Wood and Wood Products, p. -, 2022.
- ROCHA, T. M. S.; PEREIRA, L. S.; MIRANDA, L. F. R.; REIS, A. S.; MANNS, M. P. A. Influência do gesso e do cimento Portland nas propriedades de compósitos contendo partículas de madeira. ENGENHARIA CIVIL UM (BRAGA), v. 60, p. 31-39, 2022.
- ROCHA, T. M. S.; MENDES, S. E. S.; REUS, G. C.; COELHO JUNIOR, G.; PARCHEN, C. F. A. Influence of chemical admixtures and of pre-treatment in wood-cement composites. CONSTRUINDO, v. 13, p. 1-14, 2021.
- ROCHA, T. M. S.; MENDES, S. E. S.; REUS, G. C.; COELHO JUNIOR, G.; PARCHEN, C. F. A.; MIRANDA, L. F. R. Aditivos químicos em compósitos de gesso-madeira pré-tratados ou não com suspensão de hidróxido de cálcio. REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA E SUSTENTABILIDADE, v. 8, p. 8, 2020.
- CAMPOS, H. F.; ROCHA, T. M. S.; REUS, G. C.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS, v. 12, p. 210-232, 2019.
- ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R. Análise comparativa entre compósitos minerais produzidos com partículas de madeira passante na peneira 1,2 mm. REEC Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 15, p. 233-244, 2019.
- ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R.; PARCHEN, C. F. A. Influência da composição granulométrica das partículas de resíduos de madeira nas propriedades de compósitos minerais: parte 1 cimento-madeira. AMBIENTE CONSTRUÍDO (ONLINE), v. 19, p. 113-126, 2019.
- ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R.; PARCHEN, C. F. A. Influência da composição granulométrica das partículas de resíduos de madeira nas propriedades de compósitos minerais: parte 2 gesso-madeira. AMBIENTE CONSTRUÍDO (ONLINE), v. 19, p. 195-206, 2019.

- MIRANDA, L. F. R.; VOGT, V.; ROCHA, T. M. S. Usina móvel inovadora para reciclagem de RCD. Revista TECHNE, v. 1, p. 12, 2019.
- FUKUI, E.; MARTINS, E. J.; CAMPOS, H. F.; PINTO, M. C.; LOPES, S. H.; ROCHA, T. M. S.; LORIVAL, V.; COSTA, M. R. M. M. . Efeito do procedimento de mistura no comportamento no estado fresco de argamassas de revestimento produzida em obra e industrializada. Materia - Rio de Janeiro, v. 23, p. e-11956, 2018.
- IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; VIEIRA, H. C.; ANDRADE, R.; ROCHA, T. M. S.; FERREIRA, V. R. da S. . Viabilidade de uso da madeira de Cupressus torulosa para produção de painéis compensados. Scientia Forestalis, v. 46, p. 638-645, 2018.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; SAVASTANO, H.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre–cement based materials in Sao Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, n. 27, p. 527–536, 2005. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004

AHMADIAN, A. F. F.; RASHIDI, T. H.; AKBARNEZHAD, A.; WALLER, S. T. BIMenabled sustainability assessment of material supply decisions. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 24, n. 4, p. 668-695, 2017. DOI 10.1108/ECAM-12-2015-0193

AINSTEIN, L. Urbanización, medio ambiente y sustentabilidad en Argentina. Cuaderno Urbano. Espacio, Cultura, Sociedad, v. 12, n. 12, p. 173-189, 2012. DOI 10.30972/crn.1212562

AKHLAGHI, O.; AYTAS, T.; TATLI, B.; SEZER, D.; HODAEI, A.; FAVIER, A.; SCRIVENER, K.; MENCELOGLU, Y. Z.; AKBULUT, O. Modified poly(carboxylate ether)based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 101, p. 114–122, 2017. DOI 10.1016/j.cemconres.2017.08.028

AL RIM, K.; LEDHEM, A.; DOUZANE, O.; DHEILLY, R. M.; QUENEUDEC, M. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. **Cement and Concrete Composites**, n. 21, p. 269-276, 1999. DOI 10.1016/S0958-9465(99)00008-6

ALMEIDA, A. E. F. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR., H. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. Cement & Concrete Composites, v. 42, p. 49-58, 2013. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001

ANDIÇ-ÇAKIR, O.; SARIKANAT, M.; TÜFEKÇI, H. B.; DEMIRCI, C.; ERDOGAN, Ü. H. Physical and mechanical properties of randomly oriented coir fiber-cementitious composites. **Composites Part B Engineering**, v. 61, p. 49-54, 2014. DOI 10.1016/j.compositesb.2014.01.029

ANDREASEN, V. A. H. M.; ANDERSEN, M. V. J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, p. 217-228, 1930. DOI 10.1007/BF01422986

ANTÓNIO, J. Acoustic behaviour of fibrous materials. In: FANGUEIRO, R. Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications. UK: Woodhead Publishing, 2011. p. 306-324.

ARASHPOUR, M.; WAKEFIELD, R.; ABBASI, B.; LEE, E. W. M.; MINAS, J. Off-site construction optimization: Sequencing multiple job classes with time constraints. **Automation in Construction**, v. 71, p. 262-270, 2016. DOI 10.1016/j.autcon.2016.08.001

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; BARRA, M. Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. **Cellulose**, v. 18, p. 281-289, 2011. DOI 10.1007/s10570-011-9493-3

ASHORI, A.; HAMZEH, Y.; AMANI, F. Lemon balm (*Melissa officinalis*) stalk: chemical composition and fiber morphology. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 19, p. 297-300, 2011. DOI 10.1007/s10924-010-0279-8

ASHORI, A.; TABARSA, T.; AZIZI, K.; MIRZABEYGI, R. Wood-wool cement board using mixture of eucalypt and poplar. **Industrial Crops and Products**, v. 34, p. 1146-1149, 2011. DOI 10.1016/j.indcrop.2011.03.033

ASHORI, A.; TABARSA, T.; SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from poplar strands. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 131-134, 2012. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.001

ASHORI, A.; TABARSA, T.; AMOSI, F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood–cement composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 126-129, 2012. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.016

ASHORI, A.; BEHZAD, H. M.; TARMIAN, A. Effects of chemical preservative treatments on durability of wood flour/HDPE composites. **Composites: Part B**, v. 47, p. 308-313, 2013. DOI 10.1016/j.compositesb.2012.11.022

ASIZ, A.; CHUI, Y. H.; DOUDAK, G.; NI, C.; MOHAMMAD, M. Contribution of plasterboard finishes to structural performance of multi-storey light wood frame buildings. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 1572-1581, 2011. DOI 10.1016/j.proeng.2011.07.198

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. The Science and Engineering of Materials. Sixth Edition. Stanford: Cengage Learning, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 74 p., 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 717-1**: Acústica — Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações -Parte 1: Isolamento a ruído aéreo. Rio de Janeiro, 2021.

. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

. NBR 7989: Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010.

. NBR 7990: Madeira - Determinação do material solúvel em hidróxido de sódio a 1%. Rio de Janeiro, 2010.

. NBR 11675: Divisórias leves internas moduladas - Verificação da resistência aos impactos. Rio de Janeiro, 2016.

. NBR 11678: Divisórias leves internas moduladas — Verificação do comportamento sob ação de cargas provenientes de peças suspensas. Rio de Janeiro, 2016.

. NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

. NBR 12127: Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2017.

. NBR 12128: Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso. Rio de Janeiro, 2019.

. NBR 13207: Gesso para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira — Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2017.

. NBR 14577: Pasta celulósica e madeira — Determinação do material solúvel em água. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 14715-1: Chapas de gesso para *drywall* – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

. NBR 14715-2: Chapas de gesso para *drywall* – Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

. NBR 14853: Madeira - Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.

. NBR 14984: Madeira - Determinação da densidade aparente de cavacos. Rio de Janeiro, 2003.

. NBR 15575-4: Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.

. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

<u>.</u>. NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

BABISCH, W. Road traffic noise and cardiovascular risk. Noise & Health, v. 10, n. 38, p. 27-33, 2008. DOI 10.4103/1463-1741.39005

BAJPAI, P. Wood and Fiber - Growth and Anatomy. In: BAJPAI, P. Biermann's Handbook of Pulp and Paper - Volume 1: Raw Material and Pulp Making. 3rd Edition. Netherlands: Elsevier, 2018. p. 75-103.

BAKATOVICH, A.; DAVYDENKO, N.; GASPAR, F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. **Energy & Buildings**, v. 180, p. 72-82, 2018. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.09.032

BANIHASHEMI, S.; TABADKANI, A.; HOSSEINI, M. R. Integration of parametric design into modular coordination: A construction waste reduction workflow. Automation in Construction, v. 88, p. 1-12, 2018. DOI 10.1016/j.autcon.2017.12.026

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. Experimentação agrícola. Jaboticabal: Funep, 2006.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**, v. 60, p. 501-508, 2014. DOI 10.1590/S0366-69132014000400007

BASPINAR, M. S.; KAHRAMAN, E. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3327-3333, 2011. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.022

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 6ª Edição, Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BELTRAN, M. G. S.; SCHLANGEN, E. Interface bond characteristics between wood fibres and a cement matrix. In: Brittle Matrix Composites 9 – **Proceedings of the 9th International Symposium**, Woodhead Publ. Ltd. (Cambridge) and Institute of Fundamental Technological Research (Warsaw), 2009

BENTCHIKOU, M.; GUIDOUM, A.; SCRIVENER, K.; SILHADI, K.; HANINI, S. Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 451-456, 2012. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.097

BERGSDAL, H.; BOHNE, R. A.; BRATTEBO, H. Projection of construction and demolitionwaste in Norway. Journal of Industrial Ecology, v. 11, n. 3, p. 27-39, 2007. DOI 10.1162/jiec.2007.1149

BIANUCCI, M. A. **El ladrillo - origenes y desarrollo**. Argentina: Área de la Tecnología y la Producción. 39 p. Relatório Técnico FAU-UNNE, 2009.

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E. Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1021-1030, 2010. DOI 10.1016/j.jclepro.2010.01.027

BOŁTRYK, M.; PAWLUCZUK, E. Properties of a lightweight cement composite with an ecological organic filler. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 97–105, 2014. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.065

BORGHI, G.; PANTINI, S.; RIGAMONTI, L. Life cycle assessment of non-hazardous construction and demolition waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). Journal of Cleaner Production, v. 184, p. 815-825, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.02.287

BRUERE, G. M. Set-retarding effects of sugars in Portland cement pastes. Nature, v. 212, p. 502-503, 1966. DOI 10.1038/212502a0

BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**, v. 44, p. 196-205, 2015. DOI 10.1016/j.wasman.2015.07.011

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J.; BIANCHINI, M. Low-cement highstrength concrete with partial replacement of Portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, 121228, 2020a. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121228

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. Journal of Cleaner **Production**, v. 265, 121907, 2020b. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121907

CARVALHO, M. A.; CALIL JÚNIOR, C.; SAVASTANO JUNIOR, H.; TUBINO, R.; CARVALHO, M. T. Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum Composites Reinforced with Recycled Cellulose Pulp. **Materials Research**, v. 11, n. 4, p. 391-397, 2008. DOI 10.1590/S1516-14392008000400002

CARVALHO, M. T. M.; LELES, M. I. G.; TUBINO, R. M. C. TG and DSC studies on plaster residues as recycled material. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.91, p. 621-625, 2008. DOI 10.1007/s10973-006-8169-y

CASTRO, V. G. Utilização de espécies da Amazônia na produção de compósitos madeiracimento por vibro-compactação. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CAVE, I. D. A theory of the shrinkage of wood. **Wood Science and Technology**, v. 6, n. 4, p. 284-292, 1972. DOI 10.1007/BF00357050

CECCOTTI, A. Composite concrete-timber structures. **Progress in Structural Engineering** and Materials, v. 4, p. 264-275, 2002.

CÉLINO, A.; FRÉOUR, S.; JACQUEMIN, F.; CASARI, P. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review. **Frontiers in Chemistry**, v. 1, n. 43, p. 1-12, 2014. DOI 10.3389/fchem.2013.00043

CERTINER, I.; SHEA, A. D. Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. **Energy & Buildings**, v. 168, p. 374-384, 2018. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.03.019

CHANLERT, P.; TONGYOO, S.; RORDRAK, C. Effects of urea–formaldehyde and polyvinyl acetate adhesive on sound absorption coefficient and sound transmission loss of palmyra palm fruit fiber composites. **Applied Acoustics**, v. 198, 108984, 2022. DOI 10.1016/j.apacoust.2022.108984

CHEN, Q. Sustainable construction: Methods and Processes. Encyclopedia of Sustainable Technologies, v. 2, p. 321-329, 2017.

CHEN, L.; SONG, N.; SHI, L.; DING, P. Anisotropic thermally conductive composite with wood-derived carbon scaffolds. **Composites Part A**, v. 112, p. 18-24, 2018. DOI 10.1016/j.compositesa.2018.05.023

CHIKHI, M.; AGOUDJIL, B.; BOUDENNE, A.; GHERABLI, A. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 267-273, 2013. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.07.019

CHIKHI, M. Young's modulus and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 589-597, 2016. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.08.034

CHOMCHARN, A.; SKAAR, C. Dynamic sorption and hygroexpansion of wood wafers exposed to sinusoidally varying humidity. **Wood Science and Technology**, v. 17, n. 4, p. 259-277, 1983. DOI 10.1007/BF00349914

CORINALDESI, V.; MAZZOLI, A.; SIDDIQUE, R. Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 281-289, 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.011

CORREIA, J. R.; ALMEIDA, N. M.; FIGUEIRA, J. R. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1745-1753, 2011. DOI 10.1016/j.jclepro.2011.05.018

COUTTS, R. S. P.; KIGHTLY, P. Bonding in wood fibre-cement composites. Journal of materials science, v. 19, p. 3355-3359, 1984. DOI 10.1007/BF00549827

COUTTS, R. S. P.; WARDEN, P. G. Air-cured, wood pulp, fibre cement composites. Journal of materials science letters, v. 4, p. 117-119, 1985. DOI 10.1007/BF00719913

CURLING, S.; KERS, J. Wood as bio-based building material: Panels. In:JONES, D.; BRISCHKE, C. **Performance of Bio-based Building Materials**, 1st Edition, Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. p. 52-61.

CUSTÓDIO, J. E. P.; EUSÉBIO, M. I. Waterborne acrylic varnishes durability on wood surfaces for exterior exposure. **Progress in Organic Coatings**, v. 56, p. 59–67, 2006. DOI 10.1016/j.porgcoat.2006.02.008

ÇOMAK, B.; BIDECI, A.; BIDECI, O. S. Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 794–799, 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029

DAI, D.; FAN, M. Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum. **Industrial Crops and Products**, v. 74, p. 417-424, 2015. DOI 10.1016/j.indcrop.2015.05.036

DE ARAÚJO, P. C., ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; TEIXEIRA, D. E.; DE SOUZA, M. R. Lignocellulosic composites from brazilian giant bamboo (*Guadua magna*). Part 2: Properties of cement and gypsum bonded particleboards. **Maderas Ciencia y tecnologia**, v. 13, n. 3, p. 297-306, 2011. DOI 10.4067/S0718-221X2011000300005

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009. DOI 10.1590/S0366-69132009000100003

DE LARRARD, F. Concrete Mixture Proportioning. London: E & FN SPON, 1999.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994. DOI 10.1016/0008-8846(94)90022-1

DE MELO, A. B.; GONÇALVES, A. F.; MARTINS, I. M. Construction and demolition waste generation and management in Lisbon (Portugal). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p. 1252-1264, 2011. DOI 10.1016/j.resconrec.2011.06.010

DEL RÍO MERINO, M.; GARCIA, P. I. AZEVEDO, I. S. W. Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered. **Waste Management & Research**, v. 28, n. 118, p. 118-129, 2009. DOI 10.1177/0734242X09103841

DI MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ANCKER, K. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. **Waste Management**, v. 75, p. 3-21, 2018. DOI 10.1016/j.wasman.2018.01.028

DIAS, S.; ALMEIDA, J.; SANTOS, B.; HUMBERT, P.; TADEU, A.; ANTÓNIO, J.; DE BRITO, J.; PINHÃO, P. Lightweight cement composites containing end-of-life treated wood – Leaching, hydration and mechanical tests. **Construction and building materials**, v. 317, 125931, 2022. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.125931

DING, Z.; ZHU, M.; TAM, V. W. Y.; YI, G.; TRAN, C. N. N. A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 676-692, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.12.101

DOBROVOLSKIENE, N.; TAMOSIUNIENE, R.; BANAITIS, A.; FERREIRA, F. A. F.; BANAITIENE, N.; TAUJANSKAITE, K.; MEIDUTE-KAVALIAUSKIENE, I. Developing a composite sustainability index for real estate projects using multiple criteria decision making. **Operational Research - An International Journal**, v. 1, p. 1-19, 2017. DOI 10.1007/s12351-017-0365-y

DOUDART DE LA GRÉE, G. C. H.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Assessing the effect of CaSO₄ content on the hydration kinetics, microstructure and mechanical properties of cements containing sugars. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 48-60, 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.067

DREXHAGE, J.; MURPHY, D. Sustainable Development: From Brundtland to Rio 2012. New York: United Nations Headquarters, 2010.

DUART, M. A. Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza volante de casca de arroz residual sem beneficiamento. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

EKICI, B.; KENTLI, A.; KÜÇÜK, H. Improving Sound Absorption Property of Polyurethane Foams by Adding Tea-Leaf Fibers. **Archives of acoustics**, v. 37, n. 4, p. 515-520, 2012. DOI 10.2478/v10168-012-0052-1

EL-DIDAMONY, H.; HELMY, I. M.; ALI, A. H.; EL-SOKKARY, T. M. Sulphate resisting and high alumina cements as rapid setting composite. **Silicates Industriels**, v. 66, n. 11-12, p. 131-137, 2001.

ELRAHMAN, M. A.; HILLEMEIER, B. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 225–233, 2014. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.024

ENVIRONMENTAL PROTECTION DEPARTMENT. Monitoring of Solid Waste in Hong Kong Waste Statistics for 2015. Hong Kong: 2016.

EUROPEAN COMMISSION. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee

of the regions - A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector. Brussels: 2013.

EUROPEAN COMMISSION. Resource efficient use of mixed wastesimproving management of construction and demolition waste - Final report. Brussels: 2017.

EUROPEAN COMITTE OF STANDARDIZATION (CEN). EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Bruxelas, 2012.

EUROPEAN COMITTE OF STANDARDIZATION (CEN). EN 12390-7: Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete. Bruxelas, 2012.

EUROPEAN COMITTE OF STANDARDIZATION (CEN). EN 13279-1: Gypsum binders and gypsum plasters - Part 1: Definitions and requirements. Bruxelas, 2008.

FAN, M.; NDIKONTAR, M. K.; ZHOU, X.; NGAMVENG, J. N. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 135-140, 2012. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.089

FENNIS, S. A. A. M. **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. 277f. Tese (Doutorado) – Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Holanda, 2011.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **Heron**, v. 57, p. 73-101, 2012. DOI

FERDOUS, W.; BAI, Y.; NGO, T. D.; MANALO, A.; MENDIS, P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. **Engineering Structures**, v. 183, p. 883-893, 2019. DOI 10.1016/j.engstruct.2019.01.061

FERREIRA, R.; PEREIRA, D.; GAGO, A.; PROENÇA, J. Experimental characterisation of cork agglomerate core sandwich panels for wall assemblies in buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 194-210, 2016. DOI 10.1016/j.jobe.2016.01.003

FIELDS, J. M. Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 104, n. 4, p. 2245-2260, 1998. DOI 10.1121/1.423770

FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook—Wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory, 2010.

FRANZEN, F. P. Análise do desempenho térmico e acústico de vedações verticais externa executadas em light steel frame. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FRYBORT, S.; MAURITZ, R.; TEISCHINGER, A.; MÜLLER, U. Cement bonded composites – a mechanical review. **Bioresources**, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008. DOI 10.15376/biores.3.2.602-626

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The laws of proportioning concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 59, p. 67–143, 1907.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R.; FUNK JR, J. E. Coal grinding and particle size distribution studies for coal-water slurries at high solids content. **Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO)**, 1980.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Predictive process control of crowded particulate suspensions – Applied to Ceramic Manufacturing. 1st Edition, New York: Springer New York, 1994.

GÁLVEZ-MARTOS, J.-L.; STYLES, D.; SCHOENBERGER, H.; ZESCHMAR-LAHL, B. Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 136, p. 166-178, 2018. DOI 10.1016/j.resconrec.2018.04.016

GAO, W.; ARIYAMA, T.; OJIMA, T.; MEIER, A. Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings. **Energy and buildings**, v. 33, n. 6, p. 553-562, 2001. DOI 10.1016/S0378-7788(00)00096-7

GARG, M.; PUNDIR, A.; SINGH, R. Modifications in water resistance and engineering properties of β -calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizer blends. **Materials and Structures**, v. 49, n. 8, p. 3253–3263, 2016. DOI 10.1617/s11527-015-0717-0

GENCEL, O.; DIAZ, J. J. D. C.; SUTCU, M.; KOKSAL, F.; RABANAL, F. P. A.; MARTINEZ-BARRERA, G.; BROSTOW, W. Properties of gypsum composites containing vermiculite andpolypropylene fibers: Numerical and experimental results. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 135-144, 2014. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.11.047

GENCEL, O.; DIAZ, J. J. D. C.; SUTCU, M.; KOKSAL, F.; RABANAL, F. P. A.; MARTINEZ-BARRERA, G. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 732-740, 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.125

GERALDO, R. H.; PINHEIRO, S. M. M.; SILVA, J. S.; ANDRADE, H. M. C.; DWECK, J.; GONÇALVES, J. P.; CAMARINI, G. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. Journal of Cleaner Production, v. 164, p. 288-300, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188

GEREKE, T.; NIEMZ, P. Moisture-induced stresses in spruce cross-laminates. Engineering Structures, v. 32, p. 600-606, 2010. DOI 10.1016/j.engstruct.2009.11.006

GIBB, A. G. F. Standardization and pre-assembly- distinguishing myth from reality using case study research. **Construction Management and Economics**, v. 19, n. 3, p. 307-315, 2001. DOI 10.1080/01446190010020435

GOMES, A. P.; DE SOUZA, H. A.; TRIBESS, A. Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil. **Applied Thermal Engineering**, v. 52, p. 84-89, 2013. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.015

GONZÁLEZ, W. A.; PÉREZ, J. F.; CHAPELA, S.; PORTEIRO, J. Numerical analysis of wood biomass packing factor in a fixed-bed gasification process. **Renewable Energy**, v. 121, p. 579-589, 2018. DOI 10.1016/j.renene.2018.01.057.

GOVIN, A.; PERCHARD, A.; GUYONNET, R. Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, p. 12-20, 2006. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002

GRAVELSINS, R. J. Studies of grinding of wood and bark-wood mixtures with the szego mill. 1998. 371 f. These (Doctor of Philosoph) – Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry – University of Toronto, Toronto, 1998. Disponível em: https://hdl.handle.net/1807/12007

GU, R.; SAIN, M. M.; KONAR, S. A feasibility study of polyurethane composite foam with added hardwood pulp. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 273-279, 2013. DOI 10.1016/j.indcrop.2012.06.006

HAAS, W.; KRAUSMANN, F.; WIEDENHOFER, D.; HEINZ, M. How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 5, p. 765-777, 2015. DOI 10.1111/jiec.12244

HACHIMI, M.; MOSLEMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, v. 24, p. 345-354, 1990. DOI 10.1007/BF00227055

HANNANT, D. J.; SIVA, S. B. V.; SREEKANTH, P. S. Cement-Based Composites. In: BEAUMONT, P. W. R.; ZWEBEN, C. H. Comprehensive Composite Materials II. 2nd Edition. Oxford: Elsevier, 2018. p. 379-420.

HARTMANN, H.; BÖHM, T.; JENSEN, P. D.; TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; GOLSER, M. Methods for size classification of wood chips. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 944-953, 2006. DOI 10.1016/j.biombioe.2006.06.010.

HASSAN, M. An experimental study on the sound transmission loss of dissimilar fuselage sandwich panels of turbojet aircraft. **Thin-Walled Structures**, v. 187, 110417, 2023. DOI 10.1016/j.tws.2022.110417

HE, P.; HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; TSANG, D. C. W. Mechanical, durability and environmental aspects of magnesium oxychloride cement boards incorporating waste wood. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 391-399, 2019. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.015

HEKAL, E. E. Effect of silica fume on physicochemical and mechanical properties of hardened cement pastes: I – Hydration kinetics, phase composition and compressive strength. **Silicates Industriels**, v. 64, n. 9-1, p. 163-167, 1996.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; BOLLATI, M. R.; DEL RIO, M. R.; PARGA-LANDA, B. Development of cork-gypsum composites for building applications. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 179-186, 1999. DOI 10.1016/S0950-0618(99)00021-5

HETTIARACHCHI, H. A. C. K.; MAMPEARACHCHI. Effect of vibration frequency, size ratio and large particle volume fraction on packing density of binary spherical mixtures. **Powder Technology**, v. 336, p. 150–160, 2018. DOI 10.1016/j.powtec.2018.05.049

HÖGLMEIER, K.; WEBER-BLASCHKE, G.; RICHTER, K. Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction—A case study for south-east Germany. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 81-91, 2013. DOI 10.1016/j.resconrec.2013.07.004

HOLSTOV, A.; BRIDGENS, B.; FARMER, G. Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 570–582, 2015. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.136

HON, D. N. -S.; SHIRAISHI, N. Wood and cellulosic chemistry, second edition, revised, and expanded. 2nd Edition. New York: CRC Press, 2000.

HONG, J.; SHEN, G. Q.; MAO, C.; LI, Z.; LI, K. Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: an inputeoutput-based hybrid model. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2198-2207, 2016. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.10.030

HORTTANAINEN, M.; SAASTAMOINEN, J.; SARKOMAA, P. Operational limits of ignition front propagation against airflow in packed beds of different wood fuels. **Energy Fuels**, v. 16, p. 676-686, 2002. DOI 10.1021/ef010209d.

HOSSAIN, M. U.; LEU, S-Y.; POON, C. S. Sustainability analysis of pelletized bio-fuel derived from recycled wood product wastes in Hong Kong. Journal of Cleaner Production, v. 113, p. 400-410, 2016. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.11.069

HOSSAIN, M. U.; WANG, L.; YU, I. K. M.; TSANG, D. C. W.; POON, C-S. Environmental and technical feasibility study of upcycling wood waste into cement-bonded particleboard. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 474-480, 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.066

HOSSEINI, M. R.; BANIHASHEMI, S.; MARTEK, I.; GOLIZADEH, H.; GHODOOSI, F. Sustainable delivery of megaprojects in Iran: integrated model of contextual factors. Journal of Management in Engineering, v. 34, n. 2, 05017011-1, 2018. DOI 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.000058

HOU, J.; JIN, Y.; CHE, W.; YU, Y. Value-added utilization of wood processing residues into cement-bonded particleboards with admirable integrated performance. **Construction and Building Materials**, v. 344, 128144, 2022. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128144

HUANG, K..; LIANG, H.; HUNG, M. Improvement in fire prevention performance of corkgypsum decorative materials by applying porous waste. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 5, n. 12, p. 2038-2044, 2010.

INCE, C.; TAYANÇLI, S.; DEROGAR, S. Recycling waste wood in cement mortars towards the regeneration of sustainable environment. **Construction and Building Materials**, v. 299, 123891, 2021. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.123891

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório 2017, São Paulo, 2017.
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10140-2**: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation, 2010.

IRIZARRY, R.; CHEN, A.; CARWFORD, R.; CODAN, L.; SCHOELL, J. Data-driven model and model paradigm to predict 1D and 2D particle size distribution from measured chord-length distribution. **Chemical Engineering Science**, v. 164, p. 202-218, 2017. DOI 10.1016/j.ces.2017.01.042

JAILLON, L.; POON, C. S.; CHIANG, Y. H. Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. **Waste Management**, v. 29, p. 309-320, 2009. DOI 10.1016/j.wasman.2008.02.015

JEENCHAM, R.; SUPPAKARN, N.; JARUKUMJORN, K. Effect of flame retardants on flame retardant, mechanical, and thermal properties of sisal fiber/polypropylene composites. **Composites: Part B**, v. 56, p. 249-253, 2014. DOI 10.1016/j.compositesb.2013.08.012

JELLE, B. P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2549-2563, 2011. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.05.015

JEON, J. Y.; RYU, J. K.; LEE, P. J. A quantification model of overall dissatisfaction with indoor noise environment in residential buildings. **Applied Acoustics**, v. 71, p. 914-921, 2010. DOI 10.1016/j.apacoust.2010.06.001

JESEN, P. D.; TEMMERMAN, M.; WESTBORG, S. Internal particle size distribution of biofuel pellets. **Fuel**, v. 90, p. 980-986, 2011. DOI 10.1016/j.fuel.2010.11.029.

JIA, R.; WANG, Q.; FENG, P. A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field. **Composites Part B: Engineering**, v. 205, 108540, 2021. DOI 10.1016/j.compositesb.2020.108540

JIN, R.; LI, B.; ZHOU, T.; WANATOWSKI, D.; PIROOZFAR, P. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 126, p. 86-98, 2017. DOI 10.1016/j.resconrec.2017.07.034

JUENGER, M. C. G.; JENNINGS, H. M. New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 393- 399, 2002. DOI 10.1016/S0008-8846(01)00689-5

JUNGMEIER, G.; WERNER, F.; JARNEHAMMAR, A.; HOHENTAL, C.; RICHTER, K. Allocation in LCA of wood-based products - Experiences of cost action E9 - Part I. Methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, p. 290-294, 2002. DOI 10.1007/BF02978686

JUSTNES, H. Low porosity through optimized particle packing of concrete matrix. Oslo: SINTEF Building and Infrastructure, 2009.

KALIA, S.; KAITH, B. S.; KAUR, I. Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites—A Review. **Polymer engineering and science**, v. 49, n. 7, p. 1253-1272, 2009. DOI 10.1002/pen.21328

KAMALI, M.; HEWAGE, K. Life cycle performance of modular buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1171-1183, 2016. DOI 10.1016/j.rser.2016.05.031

KANDARE, E.; LUANGTRIRATANA, P.; KANDOLA, B. K. Fire reaction properties of flax/epoxy laminates and their balsa-core sandwich composites with or without fire protection. **Composites: Part B**, v. 56, p. 602-610, 2014. DOI 10.1016/j.compositesb.2013.08.090

KANG, C.; OH, S.; LEE, T.; KANG, W.; MATSUMURA, J. Sound absorption capability and mechanical properties of a composite rice hull and sawdust board. **Journal of Wood Science**, v. 58, n. 3, p. 273-278, 2012. DOI 10.1007/s10086-011-1243-5

KARADE, S. R.; IRLE, M.; MAHER, K. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 64, n. 4, p. 281-286, 2006. DOI 10.1007/s00107-006-0103-2

KATZ, A.; BAUM, H. A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction sites. **Waste Management**, v. 31, p. 353-358, 2011. DOI 10.1016/j.wasman.2010.01.008

KAW, A. K. Mechanics of composite materials. 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group, 2006.

KECK, S.; FULLAND, M. Effect of fibre volume fraction and fibre direction on crack paths in flax fibrereinforced composites. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 167, p. 201-209, 2016. DOI 10.1016/j.engfracmech.2016.03.037

KERN, A. P.; AMOR, L. V.; ÂNGULO, S. C.; MONTELONGO, A. Factors influencing temporary wood waste generation in high-rise building construction. **Waste Management**, v. 78, p. 446-455, 2018. DOI 10.1016/j.wasman.2018.05.057.

KESHARWANI, A.; BEDI, R.; BAGHA, A. K.; BAHL, S. Experimental study to measure the sound transmission loss of natural fibers at tonal excitations. **Materials Today: Proceedings**, v. 28-3, p. 1554-1559, 2020. DOI 10.1016/j.matpr.2020.04.839

KIDALOVA, L.; STEVULOVA, N.; TERPAKOVA, E.; SICAKOVA, A. Utilization of alternative materials in lightweight composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 34, p. 116-119, 2012. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.01.031

KIM, M. H.; SONG, H. B. Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 199-207, 2014. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.01.039

KIM, H.; TOWNSEND, T. Evaluation of pressure treated wood impact on landfill waste decomposition using a methane yield assay. **Chemosphere**, v. 67, p. 1252-1257, 2007. DOI 10.1016/j.chemosphere.2006.08.039

KLEIN, N. S.; CAVALARO, S.; AGUADO, A.; SEGURA, I.; TORALLES, B. The wetting water in cement-based materials: Modeling and experimental validation. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 34-43, 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.164.

KLEIN, N. S.; LENZ, L. A.; MAZER, W. Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. **Construction and Building Materials**, v. 242, 118086, 2020. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118086

KLIMCZEWSKI, M.; NICEWICZ, D. Properties of selected hdf pulp with recovered fibers added. **Drewno**, v. 56, n. 189, p. 89-100, 2013.

KOCK, I.; HUHN, K. Influence of particle shape on the frictional strength of sediments - A numerical case study. **Sedimentary Geology**, v. 196, n. 1-4, p. 217-233, 2007. DOI 10.1016/j.sedgeo.2006.07.011. DOI 10.1016/j.sedgeo.2006.07.011

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JR., W. A. Principles of Wood Science and Technology - I Solid Wood. New York: Springer-Verlag, 1968.

KOLYA, H.; KANG, C. W. Oxidation treatment on wood cell walls affects gas permeability and sound absorption capacity. **Carbohydrate Polymers**, v. 276, 118874, 2022. DOI 10.1016/j.carbpol.2021.118874

KONCAR, V. Composites and hybrid structures. In: KONCAR, V. Smart textiles for in situ monitoring of composites. 1st Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. p. 153-215.

KOSSATZ, G.; LEMPFER, K. Zur Herstellung gipsgebundener Spanplatten in einem Halbtrockenverfahren. Holz als Roh- und Werkstoff, v. 40, p. 333-337, 1982.

KOUTNÝ, O.; KRATOCHVÍL, J.; SVEC, J.; BEDNÁREK, J. Modelling of packing density for particle composites design. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 198-205, 2016. DOI 10.1016/j.proeng.2016.07.386

KRÜGER, E. L.; ADRIAZOLA, M.; MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Thermal analysis of woodcement panels: Heat flux and indoor temperature measurements in test cells. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2299-2305, 2009. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.010

KUMAR, S.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. **The Indian Concrete Journal**, v. 77, p. 1324-1331, 2003.

KUQO, A.; MAI, C. Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass *Posidonia oceanica* and pine (*Pinus sylvestris*) wood fibers. **Construction and Building Materials**, v. 282, 122714, 2021. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122714

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various, shape parameters on packing of aggregate particles. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, n. 2, p. 91–100, 2001.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 270–277, 2014. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.022

KWAN, A. K. H.; WONG, V.; FUNG, W. W. S. A 3-parameter packing density model for angular rock aggregate particles. **Powder Technology**, v. 274, p. 154-162, 2015. DOI 10.1016/j.powtec.2014.12.054

LA MANTIA, F. P.; MORREALE, M. Green composites: A brief review. Composites: Part A, v. 42, p. 579-588, 2011. 10.1016/j.compositesa.2011.01.017

LACEY, A. W.; CHEN, W.; HAO, H.; BI, K. Structural response of modular buildings – An overview. **Journal of Building Engineering**, v. 16, p. 45-56, 2018. DOI 10.1016/j.jobe.2017.12.008

LANGE, F.; MÖRTEL, H.; RUDERT, V. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 10, p. 1481-1488, 1997. DOI 10.1016/S0008-8846(97)00189-0

LATORRACA, J. V. de F. *Eucalyptus* spp. na produção de painéis de cimento-madeira. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

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

LAWRENCE, M.; SHEA, A.; WALKER, P.; DE WILDE, P. Hygrothermal performance of bio-based insulation materials. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v. 166, n. 4, p. 257-263, 2013. DOI 10.1680/coma.12.00031

LAWSON, R. M.; OGDEN, R. G. Sustainability and Process Benefits of Modular Construction. In: Proceedings of the 18th CIB World Building Congress, TG57-Special Track, Salford, UK, p. 38-51, 2010.

LAWSON, R. M.; OGDEN, R. G.; BERGIN, R. Application of Modular Construction in High-Rise Buildings. Journal of architectural engineering, v. 18, n. 2, p. 148-154, 2012. DOI 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000057

LAWSON, R. M.; RICHARDS, J. Modular design for high-rise buildings. Structures and Buildings, v. 163, n. SB3, p. 151-164, 2010. DOI 10.1680/stbu.2010.163.3.151

LENIS, Y. A.; PÉREZ, J. F.; MELGAR, A. Fixed bed gasification of Jacaranda Copaia wood: Effect of packingfactor and oxygen enriched air. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 166-175, 2016. DOI 10.1016/j.indcrop.2016.01.053.

LESAGE, K.; CIZER, Ö.; DESMET, B.; VANTOMME, J.; DE SCHUTTER, G.; VANDEWALLE, L. Plasticising mechanism of sodium gluconate combined with PCE. Advances in Cement Research, v. 27, n. 3, p. 163–174, 2015.

LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. **Powder Technology**, v. 253, p. 514-521, 2014. DOI 10.1016/j.powtec.2013.12.020

LI, M.; PU, Y.; THOMAS, V. M.; YOO, C. G.; OZCAN, S.; DENG, Y.; NELSON, K.; RAGAUSKAS, A. J. Recent advancements of plant-based natural fiber–reinforced composites and their applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 200, 108254, 2020. DOI 10.1016/j.compositesb.2020.108254

LI, Y.; CHEN, X.; WANG, X.; XU, Y.; CHEN, P-H. A review of studies on green building assessment methods by comparative analysis. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 152-159, 2017. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.04.076

LI, Y.; LI, J. Fabrication of reversible thermoresponsive thin films on wood surfaces with hydrophobic performance. **Progress in Organic Coatings**, v. 119, p. 15-22, 2018. DOI 10.1016/j.porgcoat.2018.02.004

LI, Z.; SHEN, G. Q.; ALSHAWI, M. Measuring the impact of prefabrication on construction waste reduction: An empirical study in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 91, p. 27-39, 2014. DOI 10.1016/j.resconrec.2014.07.013

LI, Z. J.; WANG, L. J.; WANG, X. G. Flexural characteristics of coir fiber reinforced cementitious composites. **Fibers and Polymers**, v. 7, p. 286-294, 2006. DOI 10.1007/BF02875686

LIMA, A. J. M. Utilização de resíduo de Pinus spp e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural. 281 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LIN, X.; CHEN, X.; WENG, L.; HU, D.; QIU, C.; LIU, P.; ZHANG, Y.; FAN, M.; SUN, W.; GUO, X. In-situ copper ion reduction and micro encapsulation of wood-based composite PCM with effective anisotropic thermal conductivity and energy storage. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 242, 111762, 2022. DOI 10.1016/j.solmat.2022.111762

LLATAS, C. Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste. In: PACHECO-TORGAL, F.; DING, Y. Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. 1st Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 25-52.

LONDERO, C.; KLEIN, N. S.; MAZER, W. Study of low-cement concrete mix-design through particle packing techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 42, 103071, 2021. DOI 10.1016/j.jobe.2021.103071

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; DOS SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, v. 63, p. 22-33, 2017. DOI 10.1590/0366-69132017633652018

LU, W.; YUAN, H.; LI, J.; HAO, J. J. L.; MI, X.; DING, Z. An empirical investigation of construction and demolition waste generation rates in Shenzhen city, South China. **Waste Management**, v. 31, p. 680-687, 2011. DOI 10.1016/j.wasman.2010.12.004

LU, Z.; HU, X.; LU, Y. Particle morphology analysis of biomass material based on improved image processing method. **International Journal of Analytical Chemistry**, 5840690, 2017. DOI 10.1155/2017/5840690

LUKAWSKI, D.; LEKAWA-RAUS, A.; LISIECKI, F.; KOZIOL, K.; DUDKOWIAK, A. Towards the development of superhydrophobic carbon nanomaterial coatings on wood. **Progress in Organic Coatings**, v. 125, p. 23-31, 2018. DOI 10.1016/j.porgcoat.2018.08.025

LUSHNIKOVA, N.; DVORKIN, L. Sustainability of gypsum products as a construction material. In: KHATIB, J. M. Sustainability of Construction Materials. 2nd Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. p. 643-681.

MA, E.; NAKAO, T.; ZHAO, G.; OHATA, H.; KAWAMURA, S. Dynamic sorption and hygroexpansion of wood subjected to cyclic relative humidity changes. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. 2, p. 229-236, 2010.

MALESZA, J.; MIEDZIALOWSKI, C. Current directions in development of modern woodframed houses. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 701-705, 2017. DOI 10.1016/j.proeng.2017.02.084

MANOUCHEHRINEJAD, M.; GIESEN, I.; MANI, S. Grindability of torrefied wood chips and wood pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 182, p. 45-55, 2018. DOI 10.1016/j.fuproc.2018.10.015

MANSUR, M. A.; AZIZ, M. A. A study of jute fibre reinforced cement composites. The international journal of cement composites and lightweight concrete, v. 4, n. 2, p. 75-82, 1982. DOI 10.1016/0262-5075(82)90011-2

MANTAU, U.; WEIMAR, H.; KLOOCK, T. Standorte der Holzwirtschaft Holzrohstoffmonitoring - Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Hamburg: 2012.

MAO, C.; SHEN, Q.; SHEN, L.; TANG, L. Comparative study of greenhouse gas emissions between off-siteprefabrication and conventional construction methods: Two casestudies of residential projects. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 165-176, 2013. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.07.033

MARQUES, B.; ANTÓNIO, J.; ALMEIDA, J.; TADEU, A., DE BRITO, J.; DIAS, S.; PEDRO, F.; SENA, J. D. Vibro-acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and recycled rubber granules. **Construction and Building Materials**, v. 264, 120221, 2020. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.120221

MARTIAS, C.; JOLIFF, Y.; FAVOTTO, C. Effects of the addition of glass fibers, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based composite at room temperature and during a fire test. **Composites: Part B**, v. 62, p. 37-53, 2014. DOI 10.1016/j.compositesb.2014.02.019

MASCHE, M.; PUIG-AMAVAT, M.; JENSEN, P. A.; HOLM, J. K.; CLAUSEN, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. From wood chips to pellets to milled pellets: The mechanical processing pathway of Austrian pine and European beech. **Powder Technology**, v. 350, p. 134-145, 2019. DOI 10.1016/j.powtec.2019.03.002.

MATOSKI, A. Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MATOSKI, A.; RIBEIRO, R. S. Evaluation of the acoustic performance of a modular construction system: Case study. **Applied Acoustics**, v. 106, p. 105-112, 2016. DOI 10.1016/j.apacoust.2016.01.004 Get rights and content

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, p. 120-131, 2017. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.005

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

MENDES, R. F.; VILELA, A. P.; FARRAPO, C. L.; MENDES, J. F.; DENZIN, G. H.; TONOLI, D.; MENDES, L. M. Lignocellulosic residues in cement-bonded panels. In: SAVASTANO JR., H.; FIORELLI, J.; DOS SANTOS, S. F. Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites. 1st Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. p. 3-16.

MERCANTE, I. T.; BOVEA, M. D.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; ARENA, A. P. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 232-241, 2012. DOI 10.1007/s11367-011-0350-2

MERCER, T. G.; FROSTICK, L. E. Leaching characteristics of CCA-treated wood waste: A UK study. Science of the Total Environment, v. 427-428, p. 165-174, 2012. DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.04.008

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 601-605, 2009. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010

MICHAUD, D. S.; KEITH, S. E.; MC MURCHY, D. Noise annoyance in Canada. Noise & Health, v. 7, n. 27, p. 39-47, 2005.

MIKAC, U.; SERSA, I.; ZUPANC, M. Z.; HUMAR, M.; MERELA, M.; OVEN, P. Application of MR microscopy for research in wood science. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 269, p. 51-55, 2018. DOI 10.1016/j.micromeso.2017.03.025

MILLER, D. P.; MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: effect of model Compounds on hydration characteristics and tensile strength. **Wood and Fiber Science**, v. 23, n. 4, p. 472-482, 1991.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MITTAL, G.; RHEE, K. Y.; MISKOVIC-STANKOVIC, V.; HUI, D. Reinforcements in multiscale polymer composites: Processing, properties, and applications. **Composites Part B**, v. 138, p. 122-139, 2018. DOI 10.1016/j.compositesb.2017.11.028

MIYATAKE, A.; FUJII, T.; HIRAMATSU, Y.; ABE, H.; TONOSAKI, M. Manufacture of wood strand–cement composite for structural use. In: EVANS, P. D. **Wood–cement composites in the Asia–Pacific Region**. Australia: ACIAR Proceedings, 2000. p. 148-152.

MOINI, M.; FLORES-VIVIAN, I.; AMIRJANOV, A.; SOBOLEV, K. The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 93, n. 15, p. 627-634, 2015. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.019

MONAHAN, J.; POWELL, J. C. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 179-188, 2011. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.09.005 MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada à Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MORRELL, J. J. Protection of Wood-Based Materials. In: KUTZ, M. Handbook of Environmental Degradation of Materials. 3rd Edition. Oxford: Elsevier, 2018. p. 343-368.

MORALES-CONDE, M. J.; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C.; PEDREÑO-ROJAS, M. A. Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 6-14, 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.137

MOSLEMI, A. A. Particle geometry in: MOSLEMI, A. A. **Particleboard. Vol.1: Material.** Souther Illinois University. p. 49 - 67. 1974

MOSLEMI, A. A. Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. Advanced Performance Materials, v. 6, p. 161-179, 1999. DOI 10.1023/A:1008777812842

MOSLEMI, A. A.; BEGUM, S. **Wood Composites:Mineral-Bonded**. In: Encyclopedia of Materials: Science and Technology, p. 9609-9612, 2001.

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-portland cement-water systems. **Wood and fiber science**, v. 5, n. 2, p. 164-176, 1983.

MOSTOFINEJAD, D.; REISI, M. A new DEM-based method to predict packing density of coarse aggregates considering their grading and shapes. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 414–420, 2012. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.008

MOURITZ, A. P.; FEIH, S.; JANDARE, E.; GIBSON, A. G. Thermal-mechanical modelling of laminates with fire protection coating. **Composites: Part B**, v. 48, p. 68-78, 2013. DOI 10.1016/j.compositesb.2012.12.001

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

NASSER, R. A.; SALEM, M. Z. M.; AL-MEFARREJ, H. A.; AREF, I. M. Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 72, p. 246-256, 2016. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2016.06.008

NAZERIAN, M.; GOZALI, E.; GHALEHNO, M. D. The influence of wood extractives and additives on the hydration kinetics of cement paste and cement-bonded particleboard. **Journal of applied sciences**, v. 11, n. 12, p. 2186-2192, 2011. DOI 10.3923/jas.2011.2186.2192

NEVILLE, A. M. Properties of concrete. England: Pearson Education Limited, 2011.

NEWCOMBE, M. P.; PAMPANIN, S.; BUCHANAN, A.; PALERMO, A. Section Analysis and Cyclic Behavior of Post-Tensioned Jointed Ductile Connections for Multi-Story Timber Buildings. Journal of Earthquake Engineering, v. 12, n. S1, p. 83-110, 2008. DOI 10.1080/13632460801925632

NG, R.; SHI, C. W. P.; TAN, H. X.; SONG, B. Avoided impact quantification from recycling of wood waste in Singapore: an assessment of pallet made from technical wood versus virgin softwood. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 447-457, 2014. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.07.053

NG, T-T.; WEI, Z.; GANG, M.; XIAO-LIN, C. Macroscopic and microscopic behaviors of binary mixtures of different particle shapes and particle sizes. **International Journal of Solids and Structures**, v. 135, p. 74-84, 2018. DOI 10.1016/j.ijsolstr.2017.11.011

NG, W. Y.; CHAU, C. K. New life of the building materials- recycle, reuse and recovery. **Energy Procedia**, v. 75, p. 2884-2891, 2015. DOI 10.1016/j.egypro.2015.07.581

NOZAHIC, V.; AMZIANE, S.; TORRENT, G.; SAÏDI, K.; DE BAYNAST, H. Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 231-241, 2012. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS. Del Río Merino, M.; Santa Cruz, J.; Hernández Olivares, F. Yeso aligerado con corcho y su aplicación em paneles para construcción. ES 2 170 612 A1. 14. set. 1999.

OLIVEIRA, C. T. A.; SELMO, S. M. S.; AGOPYAN, V. Produção e avaliação de desempenho de painel de GRG para vedação vertical interna. **Ambiente Construído**, v. 1, n. 2, p. 23-36, 1997.

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of pre-treatment of rattan (*Laccosperma secundiflorum*) on the hydration of Portland cement and the development of a new compatibility index. Cement & Concrete Composites, v. 30, p. 37-43, 2008. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2007.08.002

ONUAGULUCHI, O.; PANESAR, D. K.; SAIN, M. Properties of nanofibre reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 119-124, 2014. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.072

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 96-108, 2016. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014 ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU BR). A Agenda 2030. 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/. Acesso em 20/01/2024.

OUATTARA, D.; BELEM, T.; MBONIMPA, M.; YAHIA, A. Effect of superplasticizers on the consistency and unconfined compressive strength of cemented paste backfills. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 59–72, 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.288

PACHECO-TORGAL, F. Introduction to the recycling of construction and demolition waste (CDW). In: PACHECO-TORGAL, F.; DING, Y. Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. 1st Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 1-6.

PALUMBO, M.; LACASTA, A. M.; HOLCROFT, N.; SHEA, A.; WALKER, P. Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 269-275, 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com método de compactação vibro dinâmica**. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PARK, J.; TUCKER, R. Overcoming barriers to the reuse of construction waste material in Australia: a review of the literature. **International Journal of Construction Management**, v. 17, n. 3, p. 228-237, 2017. DOI 10.1080/15623599.2016.1192248

PAVLÍKOVÁ, M.; ZEMANOVÁ, L.; POKORNÝ, J.; ZÁLESKÁ, M.; JANKOVSKÝ, O.; LOJKA, M.; SEDMIDUBSKÝ, D.; PAVLÍK, Z. Valorization of wood chips ash as an ecofriendly mineral admixture in mortar mix design. **Waste Management**, v. 80, p. 89-100, 2018. DOI 10.1016/j.wasman.2018.09.004

PEDREÑO-ROJAS, M. A.; MORALES-CONDE, M. J.; PÉREZ-GÁLVEZ, F.; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C. Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. **Journal of Cleaner Production**, n. 166, p. 690-705, 2017. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.08.077

PENG, L. Sound absorption and insulation functional composites. In: FAN, M.; FU, F. Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. p. 333-373.

PLEKHANOVA, T. A.; KERIENE, J.; GAILIUS, A.; YAKOVLEV, G. I. Structural, physical and mechanical properties of modified wood–magnesia composite. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1833-1838, 2007. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2006.06.029

PONS, O.; WADEL, G. Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia. **Habitat International**, v. 35, p. 553-563, 2011. DOI 10.1016/j.habitatint.2011.03.005

POON, C. S.; YU, A. T. W.; JAILLON, L. Reducing building waste at construction sites in Hong Kong. **Construction Management and Economics**, v. 22, n. 5, p. 461-470, 2004. DOI 10.1080/0144619042000202816

PRATA, J. G. Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de Pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (*Edge Glued Panels -* EGP). 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

QUALE, J.; ECKELMAN, M. J.; WILLIAMS, K. W.; SLODITSKIE, G.; ZIMMERMAN, J. B. Construction Matters - Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 2, p. 243-253, 2012. DOI 10.1111/j.1530-9290.2011.00424.x

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of Populus Euroamericana wood fibers. **Composites Part B**, v. 84, p. 25-32, 2016. DOI 10.1016/j.compositesb.2015.08.069

RADVILAITÈ, U.; ROMÍREZ-GÓMEZ, A.; RUSAKEVICIUS, D.; KACIANAUSKAS, R. Semi-analytical models of non-spherical particleshapes using optimised spherical harmonics. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 137, p. 376-394, 2018. DOI 10.1016/j.cherd.2018.07.031

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F. SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017. DOI 10.1016/j.rser.2016.09.107

RATAJCZAK, E.; BIDZINSKA, G.; SZOSTAK, A.; HERBEC, M. Resources of postconsumer wood waste originating from the construction sector in Poland. **Resources**, **Conservation and Recycling**, v. 97, p. 93-99, 2015. DOI 10.1016/j.resconrec.2015.02.008

REISI, A.; MOSTOFINEJAD, D.; RAMEZANIANPOUR, A. A. Computer simulation-based method to predict packing density of aggregates mixture. Advanced Powder Technology, v. 29, n. 2, p. 386-398, 2018. DOI 10.1016/j.apt.2017.11.026

REIXACH, R.; DEL REY, R.; ALBA, J.; ARBAT, G.; ESPINACH, F. X.; MUTJÉ, P. Acoustic properties of agroforestry waste orange pruning fibers reinforced polypropylene composites as an alternative to laminated. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 124-129, 2015. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.041

RIBEIRO FILHO, S. L.; OLIVEIRA, P. R.; PANZERA, T. H.; SCARPA, F. Impact of hybrid composites based on rubber tyres particles and sugarcane bagasse fibres. **Composites Part B**, v. 159, p. 157-164, 2019. DOI 10.1016/j.compositesb.2018.09.054

RICCIARDI, P.; BELLONI, E.; COTANA, F. Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. **Applied Energy**, v. 134, p. 150-162, 2014. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.07.112

ROCHA, T. M. S. Contribuição ao desenvolvimento de placas para vedação vertical produzidas com resíduo de madeira de construção, utilizando gesso e cimento como

aglomerante. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ROCHA, T. M. S.; LIMA, P. P.; MIRANDA, L. F. R.; PARCHEN, C. F. A.; RUHNKE, L. B. Influência de aditivos aceleradores de pega nas propriedades no estado fresco de compósitos de cimento e resíduos de madeira de construção. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

RODRIGUES, F.; CARVALHO, M. T.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Physicalchemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 438-445, 2013. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.02.023

ROJO, E.; ALONSO, M. V.; OLIET, M.; SAZ-OROZCO, B. D.; RODRIGUEZ, F. Effect of fiber loading on the properties of treated cellulose fiber-reinforced phenolic composites. **Composites: Part B**, v. 68, p. 185-192, 2015. DOI 10.1016/j.compositesb.2014.08.047 ROMA JR., L. C.; MARTELLO, L. SAVASTANO JR., H. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 668-674, 2008. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.001

ROMANO, R. C. O.; SCHREUS, H.; SILVA, F. B. da; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B. de; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Impacto do Tipo de Misturador e do Tempo de Mistura nas Propriedades de Argamassas Industrializadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 109-118, 2009. DOI 10.1590/s1678-86212009000400521

ROTH, L.; EKLUND, M. Environmental evaluation of reuse of by-products as road construction materials in Sweden. Waste Management, v. 23, p. 107-116, 2003. DOI 10.1016/S0956-053X(02)00052-1

RYAN, J. V. Study of gypsum plasters exposed to fire. Journal or research of the national bureau of standards, v. 66C, n. 4, 1962.

SAASTAMOINEN, J. J.; HORTTANAINEN, M.; SARKOMAA, P. Ignition wave propagation and release of volatiles in beds of wood particles. **Combustion Science and Technology**, v. 164, n. 1, p. 41-60, 2001. DOI 10.1080/00102200108935825

SAASTAMOINEN, J. J.; TAIPALE, R.; HORTTANAINEN, M.; SARKOMAA, P. Propagation of the ignition front in beds of wood particles. **Combustion and Flame**, v. 123, n. 1-2, p. 214-226, 2000. DOI 10.1016/S0010-2180(00)00144-9.

SACKEY, A. K.; SMITH, G. D. Characterizing macro-voids of uncompressed mats and finished particleboard panels using response surface methodology and X-ray CT. **Holzforschung**, v. 64, p. 343-352, 2010. DOI 10.1515/HF.2010.052

SANTONI, A.; BONFIGLIO, P.; MOLLICA, F.; FAUSTI, P.; POMPOLI, F.; MAZZANTI, V. Vibro-acoustic optimisation of Wood Plastic Composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 730-740, 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.155 SAVASTANO JR., H.; AGOPYAN, V.; NOLASCO, A. M.; PIMENTEL, L. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 433-438, 1999. DOI 10.1016/S0950-0618(99)00046-X SAVASTANO JR., H.; SANTOS, S. F.; FIORELLI, J.; AGOPYAN, V. Sustainable use of vegetable fibres and particles in civil construction. In: KHATIB, J. M. Sustainability of Construction Materials. 2nd Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. p. 477-520.

SBIA, L. A.; PEYVANDI, A.; SOROUSHIAN, P.; BALACHANDRA, A. M.; SOBOLEV, K. Evaluation of modified-graphite nanomaterials in concrete nanocomposite based on packing density principles. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 413–422, 2015. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.019

SEELEN, L. J. H.; PADDING, J. T.; KUIPERS, J. A. M. A granular Discrete Element Method for arbitrary convex particle shapes: Method and packing generation. **Chemical Engineering Science**, v. 189, p. 84-101, 2018. DOI 10.1016/j.ces.2018.05.034

SHIBIAO, Z.; ANGUO, X.; YONG, C.; ZHENGAN, C.; AIPING, H.; YUANDAO, C.; XIAOBING, H. The Preparation and Performance of Gypsum-based Composites. Applied Mechanics and Materials, v. 310, p. 46-50, 2013. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.310.46

SHRIVASTAVA, A. Plastic Properties and Testing. In: SHRIVASTAVA, A. Introduction to Plastics Engineering - A volume in Plastics Design Library. Oxford: Elsevier, 2018. p. 49-110.

SIEFFERT, Y.; HUYGEN, J. M.; DAUDON, D. Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering-architecture collaboration. Journal of Cleaner **Production**, v. 67, p. 125-138, 2014. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.12.018

SILVA, G. C.; LATORRACA, J. V. de F.; CARMO, J. F. do; FERREIRA, E. da S. Efeito de aditivos minerais sobre as propriedades de chapas cimento-madeira. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 451-456, 2006. DOI 10.1590/S0100-67622006000300015

SIMATUPANG, M. H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebunder Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 27, p. 379-382, 1979. DOI 10.1007/BF02610947

SIMATUPANG, M. H.; SCHMITT, U. Wood extractives of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and their influences on the setting of the inorganic binder in gypsum-bonded particleboards. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 6, n. 3, p. 269-285, 1994.

SINKA, M.; KORJAKINS, A.; BAJARE, D.; ZIMELE, Z.; SAHMENKO, G. Bio-based construction panels for low carbon development. **Energy Procedia**, v. 147, p. 220-226, 2018. DOI 10.1016/j.egypro.2018.07.063

SKAAR, C. Wood-Water Relations. Michigan: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.

SMITH, E. H. Mechanical Engineer's Reference Book. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1994.

SOBOLEV, K.; AMIRJANOV, A. The simulation of particulate materials packing using a particle suspension model. Advanced Powder Technology, v. 18, n. 3, p. 261–271, 2007. DOI 10.1163/156855207780860273

SOBOLEV, K.; AMIRJANOV, A. Application of genetic algorithm for modeling of dense packing of concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1449–1455, 2010. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.010

SONG, X. M.; HWANG, J. A study of the microscopic characteristics of fract ljre surface of mdi-bonded wood fiber/recycled tire rubber Composites using scanning electron microscopy. **Wood and Fiber Science**, v. 29, n. 2, p. 131-141, 1997.

SONNENFELD, C.; MENDIL-JAKANI, H.; AGOGUÉ, R.; NUNEZ, P.; BEAUCHÊNE, P. Thermoplastic/thermoset multilayer composites: A way to improve the impact damage tolerance of thermosetting resin matrix composites. **Composite Structures**, v. 171, p. 298-305, 2017. DOI 10.1016/j.compstruct.2017.03.044

SOOD, M.; DWIVEDI, G. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, p. 775-783, 2018. DOI 10.1016/j.ejpe.2017.11.005

SOROUSHIAN, P.; ELZAFRANEY, M.; NOSSONI, A.; CHOWDHURY, H. Evaluation of normal-weight and light-weight fillers in extruded cellulose fiber cement products. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, p. 69-76, 2006. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.007

SOUZA, A. M.; NASCIMENTO, M. F.; ALMEIDA, D. H.; SILVA, D. A. L.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. Journal of Cleaner Production, v. 193, p. 549-562, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.05.087

STANZL-TSCHEGG, S. E. Wood as a bioinspiring material. Materials Science and Engineering C, v. 31, p. 1174-1183, 2011. DOI 10.1016/B978-0-12-802185-9.00013-9

STASIAK, M.; MOLENDA, M.; BANDA, M.; GONDEK, E. Mechanical properties of sawdust and woodchips. Fuel, v. 159, p. 900-908, 2015. DOI 10.1016/j.fuel.2015.07.044

SUTTON, A.; BLACK, D.; WALKER, P. Natural fibre insulation - An introduction to lowimpact building materials. Watford: BRE publications, 2011.

TABARSA, T.; JAHANSHAHI, S.; ASHORI, A. Mechanical and physical properties of wheat straw boards bonded with a tannin modified phenol–formaldehyde adhesive. **Composites: Part B**, v. 42, p. 176-180, 2011. DOI 10.1016/j.compositesb.2010.09.012

TABIL, L. G. J. **Binding and pelleting characteristics of alfalfa**. These (Doctor of Philosophy) – Department of Agricultural and Bioresource Engineering – University of Saskatchewan, Saskatoon, 1996. Disponível em: http://hdl.handle.net/10388/etd-10202004-235937

TAIB, M. N. A. M.; JULKAPLI, N. M. Dimensional stability of natural fiber-based and hybrid composites. In: JAWAID, M.; THARIQ, M.; SABA, N. Mechanical and Physical Testing of

Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. p. 61-79.

TAN, H.; MA, B.; LI, X.; JIAN, S.; YANG, H. Effect of competitive adsorption between sodium tripolyphosphate and naphthalene superplasticizer on fluidity of cement paste. **Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed**, v. 29, n. 2, p. 334–340, 2014. DOI 10.1007/s11595-014-0917-4

TAN, H.; DENG, X.; GU, B.; MA, B.; LUO, S.; ZHI, Z.; GUO, Y.; ZOU, F. Effect of borax and sodium tripolyphosphate on fluidity of gypsum paste plasticized by polycarboxylate superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 394–402, 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.005

TANNOUS, K.; LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; GRACE, J. R. Physical Properties for Flow Characterization of Ground Biomass from Douglas Fir Wood. **Particulate Science and Technology**, v. 31, p. 291-300, 2013. DOI 10.1080/02726351.2012.732676

TANUI, J. K.; KIONI, P. N.; MIRRE, T.; NOWITZKI, M.; KARURI, N. W. The influence of particle packing density on wood combustion in a fixed bed under oxy-fuel conditions. **Energy**, v. 194, 116863, 2020. DOI 10.1016/j.energy.2019.116863.

TAPPI 252. Testing Procedures of Technical Association of the Pulp and Paper Industry. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2015 (coletânea de normas).

TAVARES, V.; LACERDA, N.; FREIRE, F. Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The "Moby" case study. Journal of Cleaner **Production**, v. 212, p. 1044-1053, 2019. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.12.028

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. Londo: Academic Press, 1990.

TENG, Y.; LI, K.; PAN, W.; NG, T. Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. **Building and Environment**, v. 132, p. 125-136, 2018. DOI 10.1016/j.buildenv.2018.01.026

THAKARE, P. A.; KUMAR, N.; UGALE, V. B. Sound transmission loss and flexural strength assessment of hybrid composite reinforced with natural fibers and kevlar. **Materials Today: Proceedings**, v. 19-2, p. 686-690, 2019. DOI 10.1016/j.matpr.2019.07.754

THOMAS, N. L.; BIRCHALL, J. D. The retarding action of sugars on cement hydration. Cement and Concrete Research, v. 13, p. 830-842, 1983. DOI 10.1016/0008-8846(83)90084-4

THOMAS, B. S. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 3, p. 3913-3923, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2017.10.081

TITTELEIN, P.; CLOUTIER, A.; BISSONNETTE, B. Design of a low-density wood–cement particleboard for interior wall finish. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 218-222, 2012. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.020

TIUC, A. E.; NEMES, O.; VERMESAN, H.; TOMA, A. C. New sound absorbent composite materials based on sawdust and polyurethane foam. **Composites Part B: Engineering**, v. 165, p. 120-130, 2019. DOI 10.1016/j.compositesb.2018.11.103

TOLÊDO FILHO, R. D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. Durability of alkalisensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, n. 22, p. 127–143, 2000. DOI 10.1016/S0958-9465(99)00039-6

TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO JR., H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 193-201, 2010a. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018

TONOLI, G. H. D.; SAVASTANO JR., H.; FUENTE, E.; NEGRO, C.; BLANCO, A.; ROCCO LAHR, F. A. Eucalyptus pulp fibres as alternative reinforcement to engineered cement-based composites. **Industrial Crops and Products**, v. 31, p. 225-232, 2010b. DOI 10.1016/j.indcrop.2009.10.009

TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR, H.; DELVASTO, S.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; LOPEZ DE MURPHY, M. Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. Cement & Concrete Composites, v. 33, p. 225-232, 2011. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.013

TRIANOSKI, R. Avaliação da qualidade da madeira de espécies de Pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos. 553 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

TSOUMIS, G. Science and Technology of Wood – Structure, Properties and Utilization. Remagen-Oberwinter: Verlag Kessel, 1991.

TUMMINIA, G.; GUARINO, F.; LONGO, S.; FERRARO, M.; CELLURA, M.; ANTONUCCI, V. Life cycle energy performances and environmental impacts of a prefabricated building module. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 272-283, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2018.04.059

TURGUT, P. Cement composites with limestone dust and different grades of wood sawdust. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3801-3807, 2007. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.11.008

UCHIKAWA, H.; SAWAKI, D.; HANEHARA, S. Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 353–364, 1995. DOI 10.1016/0008-8846(95)00021-6

UNITED NATIONS. Indicators of sustainable development: Guidelines and methodologies - Third Edition. New York, 2007.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2015. U.S. Geological Survey: Virginia, 2015.

USMAN, M.; KHAN, A. Y.; FAROOQ, S. H.; HANIF, A.; TANG, S.; KHUSHNOOD, R. A.; RIZWAN, S. A. Eco-friendly self-compacting cement pastes incorporating wood waste as cement replacement: A feasibility study. **Journal of Cleaner Production**, v. 190, p. 679-688, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.04.186

VASIC, S.; STANZL-TSCHEGG, S. Experimental and numerical investigation of wood fracture mechanisms at different humidity levels. **Holzforschung**, v. 61, p. 367–374, 2007. DOI 10.1515/HF.2007.056.

VASILIEV, V. V.; MOROZOV, E. V. Mechanics and Analysis of Composite Materials. London: Elsevier Science Ltd, 2001.

VELJKOVIC, M.; JOHANSSON, B. Light steel framing for residential buildings. Thin-Walled Structures, v. 44, p. 1272-1279, 2006. DOI 10.1016/j.tws.2007.01.006

VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL, A.; SATHIYA, G. K. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. **Composites: Part B**, v. 43, p. 793-796, 2012. DOI 10.1016/j.compositesb.2011.08.023

VIGÉ, D. Vehicle interior noise refinement – cabin sound package design and development. In: WANG, X. Vehicle Noise and Vibration Refinement. UK: Woodhead Publishing, 2010. p. 286-317.

VILLAS-BÔAS, B. T. Utilização de cimento Portland e resíduos de Pinus spp para fabricação de blocos vazados de baixa densidade. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

VIMMROVÁ, A.; KEPPERT, M.; SVOBODA, L.; CERNÝ, R. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 84-89, 2011. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2010.09.011

VOGT, C. Ultrafine particles in concrete - Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design. 177 f. Tese (Doutorado em Estruturas de Concreto) – School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2010.

WANG, J.; DU, B.; HUANG, Y. Experimental study on airborne sound insulation performance of lightweight double leaf panels. **Applied Acoustics**, v. 197, 108907, 2022. DOI 10.1016/j.apacoust.2022.108907

WANG, C.; XIONG, Y.; FAN, B.; YAO, Q.; WANG, H.; JIN, C.; SUN, Q. Cellulose as an adhesion agent for the synthesis of lignin aerogel with strong mechanical performance, sound-absorption and termal insulation. **Scientific Reports**, v. 6, 32383, 2016. DOI 10.1038/srep32383

WANG, L.; CHEN, S. S.; TSANG, D. C. W.; POON, C. S.; SHIH, K. Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 316-325, 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.053

WANG, L.; CHEN, S. S.; TSANG, D. C. W.; POON, C. S.; DAI, J. G. CO₂ curing and fibre reinforcement for green recycling of contaminated wood into high-performance cement-bonded particleboards. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 18, p. 107-116, 2017a. DOI 10.1016/j.jcou.2017.01.018

WANG, L.; YU, I. K. M.; TSANG, D. C. W.; LI S.; POON, C. S. Mixture design and reaction sequence for recycling construction wood waste into rapid-shaping magnesia-phosphate cement particleboard. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 56, p. 6645-6654, 2017b. DOI 10.1021/acs.iecr.7b01175

WANG, L.; TSANG, D. C. W. Carbon dioxide sequestration on composites based on waste wood. In: PACHECO-TORGAL, F.; SHI, C.; PALOMO, A. **Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. p. 431-450.

WANNINGER, F.; FRANGI, A. Experimental and analytical analysis of a post-tensioned timber connection under gravity loads. **Engineering Structures**, v. 70, p. 117-129, 2014. DOI 10.1016/j.engstruct.2014.03.042

WEATHERWAX, T. W.; BOSKO, W.; EVANS, R.; CHAMPA, J. Role of admixture in the optimization of paste backfill systems, in: R.J.A.A. Fourie (Ed.), R Jewell & AB Fourie (eds), **Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings**, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 137-146, 2010.

WEI, Y. M.; FUJII, T.; HIRAMATSU, Y.; MIYATAKE, A.; YOSHINAGA, S.; FUJII, T.; TOMITA, B. A preliminary investigation on microstructural characteristics of interfacial zone between cement and exploded wood fiber strand by using SEM-EDS. Journal of Wood Science, v. 50, p. 327-336, 2004. DOI 10.1007/s10086-003-0576-0

WEI, Y. M.; TOMITA, B. Effects of five additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards. **Journal of Wood Science**, v. 47, n. 6, p. 437-444, 2001. DOI 10.1007/BF00767895

WIHERSAARI, M. Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 444-453, 2005. DOI 10.1016/j.biombioe.2004.11.011

WONG, V.; CHAN, K. W.; KWAN, A. K. H. Applying theories of particle packing and rheology to concrete for sustainable development. **Organization, technology and management in construction: an international journal**, v. 5, n. 2, p. 844-851, 2013. DOI 10.5592/otmcj.2013.2.3

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density: a key concept for mix design of high performance concrete. **Proceedings of the Materials Science and Technology in Engineering Conference**, HKIE Materials Division, Hong Kong, May, p. 1-15, 2005.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: part 1measurement using a wet packing method. **Materials and Structures**, v. 41, p. 689-701, 2008. DOI 10.1617/s11527-007-9274-5 WOOD, D.; VAILATI, C.; MENGES, A.; RÜGGEBERG, M. Hygroscopically actuated wood elements for weather responsive and self-forming building parts – Facilitating upscaling and complex shape changes. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 782-791, 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.134

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe, 2011.

WRÓBLEWSKA, H.; SCHROETER-ZAKRZEWSKA, A.; GLUCHOWSKA, K.; WALNA-MARUWKA, A.; KLEIBER, T. Application of post-consumer wood composts in canna lily (*CANNA* X *GENERALIS* L.H. BAILEY) cultivation. **Drewno**, v. 57, n. 191, p. 5-25, 2014. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.077

XIAO, Y.; MA, J. Fire simulation test and analysis of laminated bamboo frame building. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 257-266, 2012.

XIE, X.; ZHOU, Z.; JIANG, M.; XU, X.; WANG, Z.; HUI, D. Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 78, p. 153-161, 2015. DOI 10.1016/j.compositesb.2015.03.086

YADDANAPUDI, H. S.; HICKERSON, N.; SAINI, S.; TIWARI, A. Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications. **Vacuum**, v. 146, p. 649-654, 2017. DOI 10.1016/j.vacuum.2017.01.016

YANG, Y.; BOOM, R.; IRION, B.; VAN HEERDEN, D.; KUIPER, P.; DE WIT, H. Recycling of composite materials. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 51, p. 53-68, 2012. DOI 10.1016/j.cep.2011.09.007

YANG, X.; TANG, X.; MA, L.; SOL, Y. Sound insulation performance of structural wood wall integrated with wood plastic composite. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 4, n. 2, p. 111-118, 2019. DOI 10.21967/jbb.v4i2.215

YANG, Y.; LI, X. Study on compatibility of poplar wood and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 314, 125586, 2022. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.125586

YOUSUF, S.; SANCHEZ, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 100815, 2019. DOI 10.1016/j.jobe.2019.100815

YU, A. B.; STANDISH, N. Characterisation of non-spherical particles from their packing behavior. **Powder Technology**, v. 74, p. 205-2013, 1993. DOI 10.1016/0032-5910(93)85029-9

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383-394, 2015. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024

ZHANG, H. Heat-insulating Materials and Sound-absorbing Materials. In: ZHANG, H. Building Materials in Civil Engineering - A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. UK: Woodhead Publishing, 2011. p. 304-315.

ZHANG, L.; CHEN, Z.; DONG, H.; FU, S.; MA, L.; YANG, X. Wood plastic composites based wood wall's structure and thermal insulation performance. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 6, n. 1, p. 65-74, 2021. DOI 10.1016/j.jobab.2021.01.005

ZHANG, B.; TAN, H.; MA, B.; CHEN, F.; LV, Z.; LI, X. Preparation and application of finegrinded cement in cement-based material. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 34–41, 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.023

ZHANG, X.; SKITMORE, M.; PENG, Y. Exploring the challenges to industrialized residential building in China. **Habitat International**, v. 41, p. 176-184, 2014. DOI 10.1016/j.habitatint.2013.08.005

ZHAO, J.; WANG, X. M.; CHANG, J. M.; YAO, Y.; CUI, Q. Sound insulation property of wood–waste tire rubber composite. **Composites Science and Technology**, v. 70, n. 14, p. 2033-2038, 2010.

ZHAO, J.; YAO, Y.; CUI, Q.; WANG, X. Optimization of processing variables and mechanical properties in rubber-wood particles reinforced cement based composites manufacturing technology. **Composites: Part B**, v. 50, p. 193-201, 2013. DOI 10.1016/j.compositesb.2012.10.024

ZHOU, Y.; TRABELSI, A.; EL MANKIBI, M. Hygrothermal properties of insulation materials from rice straw and natural binders for buildings. **Construction and Building Materials**, v. 372, 130770, 2023. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.130770

ZHU, M.; SONG, J.; LI, T.; GONG, A.; WANG, Y.; DAI, J.; YAO, Y.; LUO, W.; HENDERSON, D.; HU, L. Highly anisotropic, highly transparent wood composites. Advanced Materials, v. 28, p. 5181-5187, 2016. DOI 10.1002/adma.201600427

APÊNDICE A - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

As análises estatísticas realizadas, ao longo deste estudo, estão descritas e apresentadas neste apêndice. O delineamento estatístico utilizado foi análise fatorial com ênfase na natureza dos tratamentos (composição granulométrica, tipo de madeira e proporção de madeira). Para a comparação entre as médias, utilizou-se ANOVA em conjunto com o teste de Tukey, no nível de probabilidade de 95%.

Os resultados obtidos foram validados pelo Software ASSISTAT Versão 7.7 beta (2016) desenvolvido pelo Professor Francisco Silva da Universidade Federal de Campina Grande.

A análise fatorial foi aplicada sobre os resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa endurecida, de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão dos compósitos produzidos com cimento-madeira e com gesso-madeira aos 28 dias de idade.

I - ANÁLISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA EM COMPÓSITOS

As análises estatísticas realizadas com os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com os compósitos produzidos com cimento-madeira e com gesso-madeira estão apresentadas nos QUADRO I e QUADRO II respectivamente.

QUADRO I – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

	Propriedades físicas e mecânicas							
Fonte de variação	Densida	de de	Resistência à		Resistência à			
	massa end	urecida	tração na flexão		compressão			
	(kg/m^3)		(MPa)		(MPa)			
A - Composição	S		S		S			
granulométrica								
1 - CG01	1.492,94	b	4,69	а	11,53	b		
2 - CG03	1.691,16	а	2,83	b	8,31	С		
3 – CGP1,2	1.298,51	с	2,74	b	12,14	а		
B - Tipo de madeira	S		S		S			
1 - Compensado	1.490,63	b	4,42	а	13,80	а		
2 - Eucalipto	1.543,90	а	3,33	b	11,26	b		
3 - Pínus	1.447,09	с	2,50	с	6,91	с		
C - Proporção de madeira	S		S		S			
1 - 7,50%	1.581,24	а	3,11	b	12,84	а		
2 - 11%	1.471,64	b	3,83	а	10,39	b		
3 - 15%	1.428,74	с	3,30	b	8,75	с		

QUADRO II – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA

	Propriedades físicas e mecânicas							
Fonte de variação	Densidade de massa endurecida (kg/m ³)		Resistência à tração na flexão (MPa)		Resistência à compressão (MPa)			
A - Composição	S		S	S		S		
granulométrica					~			
1 – CG01	1.106,70	b	3,82	a	7,01	a		
2 - CG03	1.261,88	a	3,17	b	6,52	Ь		
3 – CGP1,2	998,49	с	0,87	b	6,85	а		
B - Tipo de madeira	S		S		S			
1 - Compensado	1.112,24	b	2,60	а	7,02	Ъ		
2 - Eucalipto	1.142,17	a	2,98	b	7,85	а		
3 - Pínus	1.112,66	b	2,29	с	5,52	с		
C - Proporção de madeira	S		S		S			
1 - 7,50%	1.151,44	а	2,71	b	7,80	a		
2 - 11%	115,65	b	2,30	a	6,17	Ъ		
3 - 15%	1.099,99	b	2,85	b	6,42	b		

II - ANÁLISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE EM COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA EM COMPÓSITOS

As análises estatísticas realizadas com os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com os compósitos produzidos com cimento-madeira e com gesso-madeira estão apresentadas nos QUADRO III e QUADRO IV respectivamente.

QUADRO III – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

	Propriedades físicas e mecânicas						
Fonte de variação	Densid	ade de	Resistência à		Resistência à		
ronte de variação	massa en	durecida	tração na flexão		compressão		
	(kg/	(kg/m^3)		(MPa)		(MPa)	
A - Condição da amostra	NS						
1 – In natura	1.356,04	а					
2 – Seca	1.336,53	а					
B - Tipo de madeira	NS		S		S		
1 - Compensado	1.375,04	а	4,84	а	23,69	а	
2 - Eucalipto	1.330,42	a	2,98	b	15,59	Ъ	
3 - Pínus	1.333,40	а	1,97	с	13,79	b	
C - Proporção	S		S		S		
madeira/aglom.				~		~	
1 - 0,0	1.651,60	а	1,91	С	30,77	а	
2 - 1,0	1.275,62	Ъ	2,40	с	15,90	Ъ	
3 - 1,5	1.269,65	b	3,81	b	12,69	с	
4 - 2,0	1.188,28	с	4,94	а	11,40	с	

QUADRO IV – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA

	Propriedades físicas e mecânicas						
Fonto do variação	Densid	ade de	Resistência à		Resistência à		
Fonte de Variação	massa en	durecida	tração na flexão		compressão		
	(kg/	(kg/m^3)		(MPa)		(MPa)	
A - Composição	NS						
granulométrica	1	0					
1 – In natura	1.069,02	а					
2 – Seca	1.070,85	а					
B - Tipo de madeira	Ν	S	NS		NS		
1 - Compensado	1.069,05	а	3,81	а	8,83	а	
2 - Eucalipto	1.068,22	а	4,11	а	8,85	a	
3 - Pínus	1.072,53	а	3,92	а	8,42	а	
C - Proporção	c c		S		s		
madeira/aglom.		,	5		5		
1 - 0,0	1.357,29	а	7,00	а	15,91	а	
2 - 1,0	1.111,44	Ъ	3,55	b	7,50	Ъ	
3 - 1,5	1.006,64	с	3,40	b	7,11	b	
4 - 2,0	972,12	d	3,16	bc	6,90	b	
5 - 2,5	902,20	e	2,61	с	6,07	с	

III - ANÁLISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO ESTUDO DO DESEMPENHO DE PLACAS DE VEDAÇÃO VERTICAL INTERNAS

As análises estatísticas realizadas com os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira estão apresentadas nos QUADRO V e QUADRO VI respectivamente.

QUADRO V – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA

	Proprie	edades fís	icas e mecânicas			
Fonte de variação	Dens	idade	Ruptura à flexão (MPa)			
	superfi	icial de				
	massa	(kg/m^2)				
A - Tipo de madeira	S		N	S		
1 - Compensado	12,19	b	2,64	a		
2 - Eucalipto	14,01	a	2,54	a		
3 - Pínus	12,80	ab	2,52	а		
B - Proporção	NS		N			
madeira/aglom.						
1 - 1,50	13,47	а	2,46	a		
2 - 1,86	13,09	a	2,58	a		
3 - 2,00	12,44	а	2,66	а		

LEGENDA: S é o valor calculado de F significativo a 95% de probabilidade; NS é o valor calculado de F não significativo a 95% de probabilidade. As médias seguidas pela mesma letra (em vermelho) não diferem estatisticamente entre si.

QUADRO VI – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA

-	Propri	edades fís	ísicas e mecânicas			
Fonte de variação	Dens	idade	Ruptura à flexão (MPa)			
	superf	icial de				
	massa	(kg/m^2)				
A - Tipo de madeira	S		N	NS		
1 - Compensado	11,08	а	1,46	а		
2 - Eucalipto	10,42	ab	1,68	a		
3 - Pínus	10,15 b		1,35	a		
B - Proporção	S		N	S		
madeira/aglom.	5					
1 - 2,00	11,03	а	1,52	a		
2 - 2,22	10,55 ab		1,37	a		
3 - 2,50	10,06 b		1,59	a		

As análises estatísticas realizadas com os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com as placas produzidas com os compósitos de cimento-madeira e de gesso-madeira contendo papel *Kraft* estão apresentadas nos QUADRO V e QUADRO VI respectivamente.

QUADRO VII – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE CIMENTO-MADEIRA CONTENDO OU NÃO PAPEL *KRAFT*

	Propriedades físicas e mecânicas			
Fonte de variação	Dens	idade	Ruptura à flexão (MPa)	
	superfi	cial de		
	massa ((kg/m^2)		
A - Tipo de madeira	S		NS	
1 - Compensado	11,42	b	3,13	a
2 - Eucalipto	12,58	а	3,13	a
3 - Pínus	12,31 ab		2,53	a
B - Presença de papel Kraft	NS		NS	
1 - Sem	12,44	а	2,66	a
2 - Com	11,77 <mark>a</mark>		3,19	a

QUADRO VIII – VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS PLACAS PRODUZIDAS COM COMPÓSITOS DE GESSO-MADEIRA CONTENDO OU NÃO PAPEL *KRAFT*

	Propriedades físicas e mecânicas			
Fonte de variação	Dens	idade	Ruptura à flexão (MPa)	
	superfi	icial de		
	massa ((kg/m^2)		
A - Tipo de madeira	S		NS	
1 - Compensado	10,30	а	1,98	а
2 - Eucalipto	9,00	b	2,06	а
3 - Pínus	9,97	а	1,83	а
B - Presença de papel Kraft	NS		Ś	
1 - Sem	10,06	а	1,59	b
2 - Com	9,45	а	2,32	а