

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS VIANA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO E VIABILIDADE TÉCNICA PARA APROVEITAMENTO
DE RESÍDUO DE SERRARIA DE QUATRO ESPÉCIES DE MADEIRA
PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS E
HETEROGÊNEOS**

Ilha Solteira
2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS VIANA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO E VIABILIDADE TÉCNICA PARA APROVEITAMENTO
DE RESÍDUO DE SERRARIA DE QUATRO ESPÉCIES DE MADEIRA
PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS E
HETEROGÊNEOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Especialidade: Engenharia de Construção Civil.

Prof. Dr. Sergio Augusto Mello da Silva

Orientador

Profa. Dra. Edna Moura Pinto

Coorientadora

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729a Souza, Matheus Viana de.
Avaliação e viabilidade técnica para aproveitamento de resíduo de serraria de quatro espécies de madeira para produção de painéis aglomerados homogêneos e heterogêneos / Matheus Viana de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
147 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia de Construção Civil, 2022

Orientador: Sérgio Augusto Mello da Silva
Coorientador: Edna Moura Pinto
Inclui bibliografia

1. Painéis aglomerados. 2. Resíduo de serraria. 3. Construção civil. 4. Madeira. 5. Adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO E VIABILIDADE TÉCNICA PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE SERRARIA DE QUATRO ESPÉCIES DE MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS E HETEROGÊNEOS.

AUTOR: MATHEUS VIANA DE SOUZA

ORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

COORDINADORA: EDNA MOURA PINTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Prof. Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA (Participação Virtual)
UNIR/DEC

Ilha Solteira, 19 de abril de 2022

DEDICATÓRIA

“Para YHWH (Yahweh), que sempre esteve comigo nessa caminhada rumo à minha vida acadêmica. Obrigado por nunca desistir de mim, amo você”

*“E para a minha metade de ‘humanas’;
A parte louca e insegura;
A parte sensível e totalmente amável;
A parte que, no oposto da lógica, enxerga que muito mais do que ter, o importante sempre será o ser.
Ser humano.”*

AGRADECIMENTOS

Nada que é durável se constrói sozinho, assim como uma edificação que, a cada bloco colocado, se torna algo diferente, algo novo. A minha vida, nesses dois anos, ofereceu mais alguns blocos erguidos na construção da minha carreira acadêmica.

O pódio do primeiro agradecimento se divide para duas pessoas. A primeira pessoa foi a que sonhou comigo, que nunca desistiu de me incentivar todas as inúmeras vezes em que eu chegava da faculdade cansado e falava: “mãe, eu quero dar aula, eu quero fazer mestrado”. Mãe, eu nunca seria metade do que sou hoje sem você, sem sua força, você é uma mulher guerreira, temente ao Senhor e exemplo de superação para todo mundo, muito obrigado por me dar a vida, por ser quem você é.

A segunda pessoa que disputa esse pódio é a que fez acontecer, que teve que aturar todos os meus áudios enormes, que conversava comigo nos finais de semana e que foi como um pai para mim nesses dois anos. Sérgio, muito obrigado por tudo o que você fez por mim, tenho orgulho de dizer pra todo mundo o quanto você é uma pessoa maravilhosa, agradeço à Deus por Ele ter colocado você na minha vida!

Gostaria de agradecer também às minhas irmãs, Carol e Stephanie, e aos meus cunhados, Diego e Fábio, pelos conselhos, orientações, por serem realmente uma família, por sempre estarem dispostos a ajudar, amo vocês.

À Marjorie, que sempre acompanhou as minhas lutas para estar aqui hoje, muito obrigado por toda a força e o apoio nesses anos desde que nos conhecemos, amo você, Marjor.

Agradeço também ao irmão que o mestrado me deu, o Pedro Cozel... Gazell..., Pedro Cazella! Cara, você é sensacional, um amigo que quero levar para toda a vida!

Para os meus segundos pais, Leticia e Arthur, que cuidaram de mim nesses últimos meses, amo muito vocês! Aos colegas de pesquisa que fiz, Felipe Reis, Karina Arcolezi, Denise Maria e outras pessoas que Deus enviou para me ajudar, para conversar, falar sobre a vida e por me ajudarem sempre que precisei.

Para Luiza Gervazio, minha grande amiga de graduação que embarcou nessa loucura de fazer mestrado quando descobri o programa de pós-graduação aqui de Ilha. Foi a melhor escolha das nossas vidas, não é mesmo?

Também para os meus filhos de Iniciação Científica: Cristie, Júlia, Josislene, Maria Eduarda, Lucas e Pedro. Mesmo pelo pouco tempo de convívio, espero ter sido útil em ensinar a vocês como funciona a vida dos pesquisadores, acredito no potencial de cada um de vocês e espero que cheguem muito mais longe do que eu cheguei aqui.

Sou grato ao professor Jorge Luis Akasaki e ao professor José Luiz Pinheiro Melges pelo aprendizado adquirido nas aulas, as quais foram essenciais para a minha formação acadêmica, e aos técnicos Gilson e Flávio por todo o suporte no laboratório e os ensinamentos.

Também sou grato a professora Márcia Regina de Moura Aouada por aceitar ser parte da minha banca de qualificação, pelas conversas, orientações e ajuda com os meus artigos.

Agradeço aos grupos: MAC - Materiais Alternativos de Construção, e GEATM - Grupo de Estudos em Arquitetura e Tecnologia da Madeira, que me deram a oportunidade de conhecer mais sobre esse universo científico. Agradeço também à minha coorientadora Edna Moura, por ter aceitado a coorientação e por todas as mentorias, conversas e ajuda.

Ao Departamento de Engenharia Civil – DEC e a todos os colaboradores.

À empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, por ter disponibilizado o adesivo sem nenhum custo.

À CAPES, pois este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

E não menos importante, a todos que lutam para concretizarem seus sonhos. Não se esqueçam: desistir não é o caminho mais fácil para alcançar os objetivos. Quando a gente se empenha em escalar a montanha, a vida nos presenteia com uma bela paisagem.

Vislumbrar o horizonte sempre vai valer a pena.

RESUMO

A alta demanda por novos materiais alternativos, que visam substituir o uso dos materiais convencionais, vem, de certa forma, ganhando espaço na construção civil a partir de inovações sustentáveis. No meio científico, não é recente a ideia de se utilizar o reaproveitamento de resíduos madeireiros para produção dos painéis aglomerados (painéis fabricados com partículas de madeira), com o objetivo de diminuir ou substituir o uso de madeiras nativas ou de áreas de florestas plantadas, trazendo também a proposta de usar adesivos que agridem menos ao meio ambiente e que não prejudicam a saúde de seus fabricantes. O Eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), o Pinus (*Pinus caribaea*), a Seringueira (*Hevea brasiliensis*) e a Teca (*Tectona grandis*) são espécies cultivadas em florestas plantadas em território nacional, sendo as duas primeiras espécies mais utilizadas para a fabricação de aglomerados em escala de produção fabril. O resíduo de serraria é o material gerado pelo processo de aplainamento ou redução da seção utilizada na madeira, pelo qual se produz uma grande quantidade de resíduo que, na maioria das vezes, não possui um descarte adequado, sendo utilizado para queima ou aterramento. O presente estudo teve como ideia central utilizar esse material residual, sem passar por nenhum processo prévio de homogeneização das partículas, no trabalho com dois tratamentos para a fabricação de painéis, o primeiro para se produzir painéis homogêneos e o segundo, heterogêneos (painéis com mais de uma camada), com o intuito de encontrar quais das quatro espécies utilizadas obtiveram os melhores resultados em ambos os tratamentos. Foi utilizado o adesivo ecológico PUR (poliuretano derivado do óleo de mamona), sendo 10% em peso seco no primeiro tratamento e 12% no segundo, de forma a confeccionar os painéis com densidade inicial de 0,550g/cm³, com 50kgf/cm² prensados durante 10 minutos, e os materiais foram avaliados de acordo com os parâmetros normativos da NBR 14810-2:2018.

Palavras-chave: resíduo de serraria; maravalha; painéis homogêneos; painéis heterogêneos.

ABSTRACT

The high demand for new alternative materials that aim to replace the use of conventional materials has been gaining popularity in civil construction based on sustainable innovations. In the scientific field, the idea of reusing wood residues for the particleboards production (panels made with wood particles) is not recent, with the objective of reducing or replacing the use of native wood or areas of planted forests, also bringing the proposal to use adhesives that are less harmful to the environment and to the health of their manufacturers. The Eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*), Pinus (*Pinus caribaea*), Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*) and Teak (*Tectona grandis*) are species cultivated in planted forests in the country, the first two species being the most used for the agglomerates manufacturing on a production scale. The sawmill residue is the material generated by the planning process or reduction of the section used in the wood, whereby it produces a large amount of residue that, in most cases, does not have a proper disposal, being used for burning or backfilling. The main idea of the present study was to use this residual material, without going through any previous process of homogenization of the particles, in two treatments for panels manufacturing, the first to produce homogeneous panels and the second for heterogeneous ones (particleboards with more than one layer), in order to find which of the four species mentioned had the best results in both treatments. The ecological adhesive PUR (polyurethane derived from castor oil) was used, being 10% in dry weight in the first treatment and 12% for the second one, making the panels with an initial density of 0.550g/cm³, with 50kgf/cm² pressed for 10 minutes, and all the materials were evaluated according to the normative parameters of NBR 14810-2:2018.

Keywords: sawmill waste; wood shavings; homogeneous panels; heterogeneous panels.

Lista de Figuras

Figura 1 - Comparativo da biocapacidade x pegada ecológica no Brasil entre os anos de 1961 a 2017.....	16
Figura 2 - Principais países aos quais os produtos florestais são exportados.....	22
Figura 3 - Produção de painéis à base de madeira – Compensado, OSB, Aglomerado e MDF.....	24
Figura 4 - Distribuição de empresas de painéis (MDP, MDF e Chapa de Fibra)	25
Figura 5 - Cadeia produtiva dos painéis aglomerados	26
Figura 6 - Distribuição de partículas ao longo do painel.....	27
Figura 7 - Exemplo da constituição química da madeira e sua estrutura.....	33
Figura 8 - Reação de formação do grupo uretano.....	53
Figura 9 - Reação de polimerização do poliuretano	53
Figura 10 - (a) seção transversal e (b) toras da árvore de Eucalipto cortada	56
Figura 11 - (a) seção transversal e (b) toras de Pinus.....	57
Figura 12 - (a) seção transversal e (b) toras de madeira de Seringueira.....	58
Figura 13 - (a) seção transversal e (b) toras de Teca.....	58
Figura 14 - Embalagem contendo o pré-polímero	59
Figura 15 - (a) moinho de facas, (b) peneira utilizada e (c) peneirador mecânico	62
Figura 16 – (a) Partículas dos painéis homogêneos, (b) partículas do núcleo dos painéis heterogêneos e (c) partículas utilizadas nas faces dos painéis heterogêneos, sendo eucalipto, pinus, seringueira e teca, respectivamente	62
Figura 17 - Aparato para determinação da granulometria da amostra	63
Figura 18 - (a) material utilizado para realizar o ensaio e (b) exemplo de material ensaiado.....	65
Figura 19 - Preparação das amostras para o ensaio de teor de umidade	68
Figura 20 – (a) Adição de adesivo e (b) colchão de partículas.....	70
Figura 21 – (a) acomodação da camada externa do painel e (b) deposição das partículas para formação do núcleo do painel.....	71
Figura 22 – (a) Colchão de partículas depositado entre os pratos da prensa, (b) colchão de partículas preparado para a prensagem com filme de PVC e (c) colchão de partículas ilustrando as três camadas de um painel heterogêneo.....	72
Figura 23 - Aspectos visuais dos painéis homogêneos produzidos.....	73
Figura 24 – (a) Aferição da E_0 e (b) da M_0	75
Figura 25 – (a) Aferição da espessura utilizando um micrômetro digital para avaliação do inchamento e (b) pesagem do cp úmido para avaliação da absorção	75
Figura 26 – (a) Pesagem dos cps para aferição da M_1 e (b) secagem dos cps para posterior aferição da M_0	77
Figura 27 - Ensaio de microscopia com lupa em cp de 50x50x12mm, que foi utilizada para a determinação da densidade dos painéis	78
Figura 28 - Desenho esquemático para a realização do ensaio de flexão.....	79
Figura 29 – Ensaio de flexão estática	79
Figura 30 – (a) Ilustração da resina epóxi utilizada e (b) do esquema de fixação dos suportes metálicos nos cps.....	81
Figura 31 – (a) Ensaio de T.P e (b) aspectos gerais do cp com suporte metálico colado após ruptura	81

Figura 32 – Detalhes dos corpos de prova de Eucalipto, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos....	95
Figura 33 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Eucalipto, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo	96
Figura 34 - Detalhes dos corpos de prova de Pinus, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos	108
Figura 35 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Pinus, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo	109
Figura 36 - Detalhes dos corpos de prova de Seringueira, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos..	120
Figura 37 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Seringueira, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo	121
Figura 38 - Detalhes dos corpos de prova de Teca, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos	130
Figura 39 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Teca, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo	131

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas informados pela norma NBR 14810-2 e suas classificações.....	26
Tabela 2 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Silva <i>et al.</i> (2021).....	41
Tabela 3 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Faria <i>et al.</i> (2020).....	42
Tabela 4 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Pierre, Ballarin e Palma (2014).....	43
Tabela 5 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Bianche <i>et al.</i> (2012).....	43
Tabela 6 - Resultado dos painéis de Pinus realizados no estudo de Silva <i>et al.</i> (2021).....	44
Tabela 7 - Resultado dos painéis de Pinus realizados no estudo de Cabral <i>et al.</i> (2017).....	45
Tabela 8 - Resultado dos painéis de Pinus realizados no estudo de Iwakiri <i>et al.</i> (2017).....	46
Tabela 9 - Resultado dos painéis de Pinus realizados no estudo de Iwakiri <i>et al.</i> (2010).....	47
Tabela 10 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Gilio <i>et al.</i> (2021).....	47
Tabela 11 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Faria <i>et al.</i> (2020).....	48
Tabela 12 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Iwakiri <i>et al.</i> (2018).....	48
Tabela 13 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Gava <i>et al.</i> (2015).....	49
Tabela 14 - Resultado dos painéis de Teca realizados no estudo de Celestino (2020).....	50
Tabela 15 - Resultado dos painéis de Teca realizados no estudo de Dias (2020).....	50
Tabela 16 - Resultado dos painéis de Teca realizados no estudo de Archangelo (2019).....	51
Tabela 17 – Propostas realizadas para a confecção dos painéis.....	61
Tabela 18 - Composição granulométrica do Eucalipto para painéis homogêneos.....	84
Tabela 19 - Distribuição granulométrica do Eucalipto para as faces do painel heterogêneo.....	85
Tabela 20 - Distribuição granulométrica do Eucalipto para o núcleo do painel heterogêneo.....	85
Tabela 21 - Resultado da massa específica do Eucalipto (<i>Eucalyptus urophylla</i>).....	86
Tabela 22 - Comparativo do resultado da massa específica do Eucalipto com os encontrados nas literaturas.....	86
Tabela 23 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Eucalipto.....	87
Tabela 24 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Eucalipto com os encontrados nas literaturas.....	88

Tabela 25 - Resultado dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Eucalipto comparados com as literaturas.....	90
Tabela 26 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Eucalipto em comparação com as literaturas propostas.....	92
Tabela 27 - Composição granulométrica do pinus para painéis homogêneos.....	97
Tabela 28 - Distribuição granulométrica do Pinus para as faces do painel heterogêneo	98
Tabela 29 - Distribuição granulométrica do Pinus para o núcleo do painel heterogêneo	98
Tabela 30 - Resultado da massa específica do Pinus (Pinus caribaea var. caribaea). 99	
Tabela 31 - Comparativo do resultado da massa específica do Pinus com os encontrados nas literaturas.....	99
Tabela 32 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Pinus.....	100
Tabela 33 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Pinus com encontrados nas literaturas.....	101
Tabela 34 - Resultado dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Pinus comparados com as literaturas	103
Tabela 35 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Pinus em comparação com as literaturas propostas	105
Tabela 36 - Composição granulométrica da Seringueira para painéis homogêneos .	110
Tabela 37 - Distribuição granulométrica da Seringueira para as faces do painel heterogêneo	111
Tabela 38 - Distribuição granulométrica da Seringueira para o núcleo do painel heterogêneo	112
Tabela 39 - Resultado da massa específica média da Seringueira (Hevea brasiliensis)	112
Tabela 40 - Comparativo do resultado da massa específica da Seringueira com os encontrados nas literaturas.....	113
Tabela 41 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Seringueira	114
Tabela 42 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Seringueira com encontrados nas literaturas	115
Tabela 43 - Resultado dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Seringueira comparados com as literaturas	116
Tabela 44 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Seringueira em comparação com as literaturas propostas	118
Tabela 45 - Composição granulométrica da Teca para painéis homogêneos	122
Tabela 46 - Distribuição granulométrica da Teca para as faces do painel heterogêneo	123
Tabela 47 - Distribuição granulométrica da Teca para o núcleo do painel heterogêneo	123
Tabela 48 - Resultado da massa específica da Teca (Tectona grandis)	124
Tabela 49 - Comparativo do resultado da massa específica da Teca com os encontrados nas literaturas.....	124
Tabela 50 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Teca.....	125

Tabela 51 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Teca com encontrados nas literaturas.....	126
Tabela 52 - Resultados dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Teca comparados com as literaturas	127
Tabela 53 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Teca em comparação com as literaturas propostas	128
Tabela 54 - Valores mínimos exigidos por norma para classificação dos painéis aglomerados de média densidade	132
Tabela 55 - Resumo das principais propriedades e classificação dos painéis	132

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Curva de calibração de picnômetro	66
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações iniciais.....	16
1.2	Relevância e justificativa	18
1.3	Objetivos.....	19
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.4	Objetivos específicos.....	19
1.4.1	<i>Primeiro tratamento</i>	20
1.4.2	<i>Segundo Tratamento</i>	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Panorama do setor florestal brasileiro	21
2.2	Painéis Aglomerados	22
2.2.1	<i>Breve histórico e definições importantes</i>	22
2.2.2	<i>Produção, Fabricação e Classificação dos painéis</i>	24
2.2.3	<i>Principais fatores que influenciam nas propriedades dos painéis</i>	29
2.3	Madeiras.....	32
2.3.1	<i>Eucalyptus urophylla (Eucalipto)</i>	34
2.3.2	<i>Pinus caribaea var. caribaea (Pinus)</i>	35
2.3.3	<i>Havea brasilienses (Seringueira)</i>	37
2.3.4	<i>Tectona grandis (Teca)</i>	38
2.4	Resíduos madeireiros na fabricação dos painéis	39
2.4.1	<i>Eucalyptus urophylla (Eucalipto)</i>	40
2.4.2	<i>Pinus caribaea var. caribaea (Pinus)</i>	44
2.4.3	<i>Havea brasilienses (Seringueira)</i>	47
2.4.4	<i>Tectona grandis (Teca)</i>	49
2.5	Adesivo	51
2.5.1	<i>Adesivo bi-componente poliuterana derivado do óleo de mamona</i>	52
3	MATERIAL E MÉTODO	56
3.1	Materiais.....	56
3.1.1	<i>Eucalyptus urophylla (Eucalipto)</i>	56
3.1.2	<i>Pinus caribaea var. caribaea (Pinus)</i>	57
3.1.3	<i>Hevea brasiliensis (Seringueira)</i>	57
3.1.4	<i>Tectona grandis (Teca)</i>	58
3.1.5	<i>Adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona</i>	59
3.2	Métodos	59

3.2.1	<i>Definição das propostas</i>	60
3.2.2	<i>Produção das partículas</i>	61
3.2.3	<i>Composição granulométrica</i>	63
3.2.4	<i>Densidade da partícula e razão de compactação</i>	64
3.2.5	<i>Umidade das partículas</i>	67
3.2.6	<i>Cálculo da massa necessária para a confecção dos painéis</i>	68
3.2.7	<i>Produção dos painéis aglomerados</i>	69
3.2.8	<i>Realização dos ensaios físicos</i>	73
3.2.9	<i>Realização dos ensaios mecânicos</i>	78
3.2.10	<i>Análise Estatística</i>	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
4.1	<i>Eucalyptus urophylla (Eucalipto)</i>	83
4.1.1	<i>Avaliação das propriedades das partículas</i>	83
4.1.2	<i>Avaliação das propriedades dos painéis</i>	87
4.1.3	<i>Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada</i>	94
4.2	<i>Pinus caribaea var. caribaea (Pinus)</i>	97
4.2.1	<i>Avaliação das propriedades das partículas</i>	97
4.2.2	<i>Avaliação das propriedades dos painéis</i>	100
4.2.3	<i>Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada</i>	107
4.3	<i>Hevea brasiliensis (Seringueira)</i>	110
4.3.1	<i>Avaliação das propriedades das partículas</i>	110
4.3.2	<i>Avaliação das propriedades dos painéis</i>	113
4.3.3	<i>Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada</i>	119
4.4	<i>Tectona grandis (Teca)</i>	122
4.4.1	<i>Avaliação das propriedades das partículas</i>	122
4.4.2	<i>Avaliação das propriedades dos painéis</i>	125
4.4.3	<i>Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada</i>	129
4.5	<i>Classificação de acordo com a NBR 14810-2 (ABNT, 2018)</i>	131
5	CONCLUSÃO	133
	REFERÊNCIAS	135

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

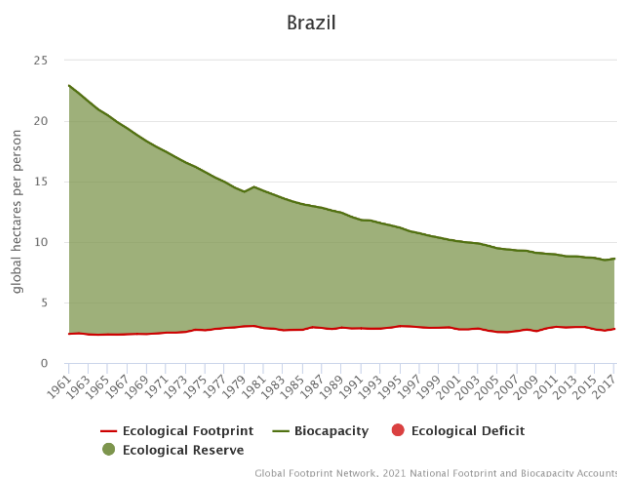
As plantas, em um contexto geral, desempenham um papel significativo nos ecossistemas da Terra. Direta ou indiretamente, todos os seres vivos dependem delas para sobreviverem (RAVEN; WACKERNAGE, 2020).

À vista disso, a influência do ser humano na biodiversidade está causando uma rápida deterioração dos recursos, de tal forma que, desde o início da agricultura, a biomassa vegetal já foi reduzida pela metade, sendo mais de 70% da superfície terrestre alterada pela humanidade (BRANDSHAW *et al.*, 2021).

Dados do *Global Footprint Network* (2017), especializado por calcular a “pegada” ecológica de cada país, mostra que grande parte dos países desenvolvidos já se encontram em *déficit* com sua biocapacidade, com destaques para países como China, Estados Unidos, Espanha, Itália, Japão, França, entre muitos outros.

Ainda segundo o *Global Footprint Network* (2017), o Brasil se encontra com um *superávit* em relação à sua reserva ecológica. Os últimos dados, referentes ao ano de 2017, mostram que a biocapacidade por pessoa era cerca de 8,6 gha (hectares globais), enquanto a pegada ecológica por pessoa estava em torno de 2,8 gha, como mostra a Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Comparativo da biocapacidade x pegada ecológica no Brasil entre os anos de 1961 a 2017



Fonte: (GFN, 2017)

Apesar de o Brasil ainda possuir uma grande reserva ecológica, é necessário que se pense além da preservação do meio ambiente, como, por exemplo, a respeito do aproveitamento dos resíduos gerados nos processos de produção de materiais e da otimização de novos produtos para aplicações, não apenas na construção civil, mas também em outros seguimentos industriais.

A madeira, por exemplo, é uma das riquezas naturais mais antigas existentes, com características amplamente aproveitadas pela humanidade, sendo presente na cultura de povos primitivos e tecnicamente avançados (SILVA, 2015). Segundo o Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF, 2020), o setor florestal brasileiro é responsável por 7,3% (US\$ 10,3 bilhões) das exportações totais do país e representa cerca de 3,5% (US\$ 37,3 bilhões) do PIB – Produto Interno Bruto brasileiro. O seguimento de madeira serrada, compensados e subprodutos, por sua vez, representa um total de US\$ 2,9 bilhões para a economia, o que demonstra sua relevância no cenário da economia nacional (SNIF, 2020).

Nesse contexto, as complicações com a escassez de recursos, resultantes do desmatamento de árvores nativas, promovem pesquisas e soluções que, a nível mundial, visam fomentar programas de metas para a utilização de resíduos industriais e agrários (VISNARDI, 2010).

Uma forma de aproveitar os materiais provenientes da produção florestal é o uso dos painéis aglomerados, de forma a conceder um destino mais nobre às madeiras de dimensões ou qualidades inferiores (GUIMARÃES JÚNIOR, 2008).

Conforme Araújo *et al.* (2019, p. 198), “Os painéis de madeira reconstituída são produzidos a partir de diferentes etapas de desagregação da madeira e compactados por adição de adesivos sintéticos sob ação de pressão e temperatura”. Apesar de ser pouco aceita na indústria, a utilização de resíduos de madeira apresenta potencial econômico, pois tais resíduos podem servir como formadores da matriz principal do produto em painéis MDF e MDP (ARAÚJO *et al.*, 2019).

Gerada pelo aplainamento das tábuas maciças, a maravalha é um dos principais resíduos gerados no processamento mecânico da madeira, e, para

utilização na confecção de painéis convencionais, necessita de processos de homogeneização e redução de suas partículas (SILVA, 2018).

Seja qual for a classificação do painel, sua produção se baseia na definição de parâmetros que estão relacionados à madeira, ao tempo de prensagem, ao adesivo, à temperatura, dentre outros elementos que, quando testados, possibilitam a criação de novos produtos, capazes de atender às demandas do mercado.

Assim, este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade da utilização da maravalha, gerada no aplainamento de quatro (4) espécies de madeira, para a produção de painéis aglomerados, sem passar pelo processo de homogeneização e redução das partículas. Para tanto, foram realizados dois processos diferentes, um em que eles são considerados painéis homogêneos e outro em que estes são estabelecidos como heterogêneos.

1.2 Relevância e justificativa

A justificativa da utilização do Eucalipto se baseia em sua alta produtividade (41 m³ por hectare), com ciclos de corte de aproximadamente 7 anos – idade inferior à de outras espécies, como o Pinus e a Seringueira –, maior taxa de retorno ao investidor e grande capacidade de adaptação em regiões diversas (EMBRAPA, 2021).

A madeira Pinus, por sua vez, possui um mercado consolidado, sendo que, nas décadas de 1970 e 1980, essa espécie foi a principal matéria-prima para o desenvolvimento da indústria florestal (EMBRAPA, 2020). Dessa forma, a aplicação do Pinus na construção civil se baseia em construções pesadas e leves, laminação, construções de barcos, compensados, fabricação de polpa de fibras longas e chapas de fibras (PINHEIRO, 1996).

Com isso, a justificativa de utilização do *Pinus caribaea* var. *caribaea* se baseia no reaproveitamento do resíduo que é gerado pelo processamento do material para fins de construção e que não possui um destino específico, sendo muitas vezes descartado ou utilizado para biomassa.

De acordo com a Associação brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013), em 2012, o plantio de Seringueira esteve em torno de 168.848 hectares, sendo os principais usos da madeira como fonte de

energia e celulose. Logo, a justificativa da utilização da Seringueira, no presente estudo, é a possibilidade que se mostrou em avaliar alternativas para a utilização desse material além das já apresentadas, agregando um valor à espécie como um resíduo.

A espécie exótica Teca, por fim, tem um ciclo de vida menor quando é plantada em clima tropical, sendo muito utilizada nos seguimentos de construção e marcenaria. O uso dessa espécie na fabricação dos painéis na presente pesquisa se baseia no resíduo gerado para a confecção das peças utilizadas na indústria naval e de construção.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi analisar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas homogêneas e heterogêneas, produzidos com maravalhas (resíduos) coletadas da marcenarias, das espécies *Eucalyptus urophylla* (Eucalipto), *Pinus Caribaea* (Pinus), *Havea brasiliensis* (Seringueira) e *Tectonagrandis* (Teca), aglutinados com adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona (PUR).

1.4 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Confeccionar painéis de acordo com os parâmetros de produção encontrados nas literaturas base para painéis homogêneos e heterogêneos;
- Avaliar os requisitos de desempenho, comparando os resultados de pesquisas correlatas, utilizando também as referências normativas ABNT NBR 14810-1:2013, o qual trata da terminologia dos painéis e de seus componentes, e ABNT NBR 14810-2: 2018, que elenca os ensaios necessários e os procedimentos de avaliação dos painéis.

- Analisar as imagens aumentadas por lupa com câmera acoplada de todas as propostas por inspeção visual, com o propósito de verificar a eficiência da compactação e do ajuste das partículas nos painéis;
- Verificando-se quais espécies apresentaram os melhores resultados por meio de dois tratamentos:

1.4.1 Primeiro tratamento

Avaliou-se a possibilidade de uso do resíduo coletado da marcenaria, contudo, realizou-se a caracterização granulométrica das partículas com o objetivo de estudar a distribuição em cada espécie. Para a fabricação dos painéis, utilizou-se a metodologia aplicada aos painéis homogêneos.

1.4.2 Segundo Tratamento

Com base nos resultados obtidos com a caracterização dos painéis produzidos com os parâmetros do primeiro tratamento, propôs-se a produção de novos painéis, todavia, o resíduo coletado no chão da marcenaria foi submetido à classificação granulométrica para separação do pó e definição dos comprimentos das partículas em duas faixas (de $\geq 1,19$ a $4,75\text{mm}$ e $\geq 4,75$ a $19,1\text{mm}$), com o objetivo final sendo a produção de painéis heterogêneos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção se subdivide em tópicos para explicitar a revisão literária utilizada para o estudo da produção dos painéis, pontuando desde o panorama florestal brasileiro, alguns conceitos históricos, bem como métodos de produção de painéis industriais até os fatores mais importantes que influenciam nas propriedades finais dos painéis aglomerados.

O propósito desta seção é desenvolver o entendimento a respeito de painéis de uma forma objetiva e concisa, sendo que também aqui serão apresentadas as literaturas que foram utilizadas para se comparar os resultados obtidos e os fatores principais aplicados em suas metodologias.

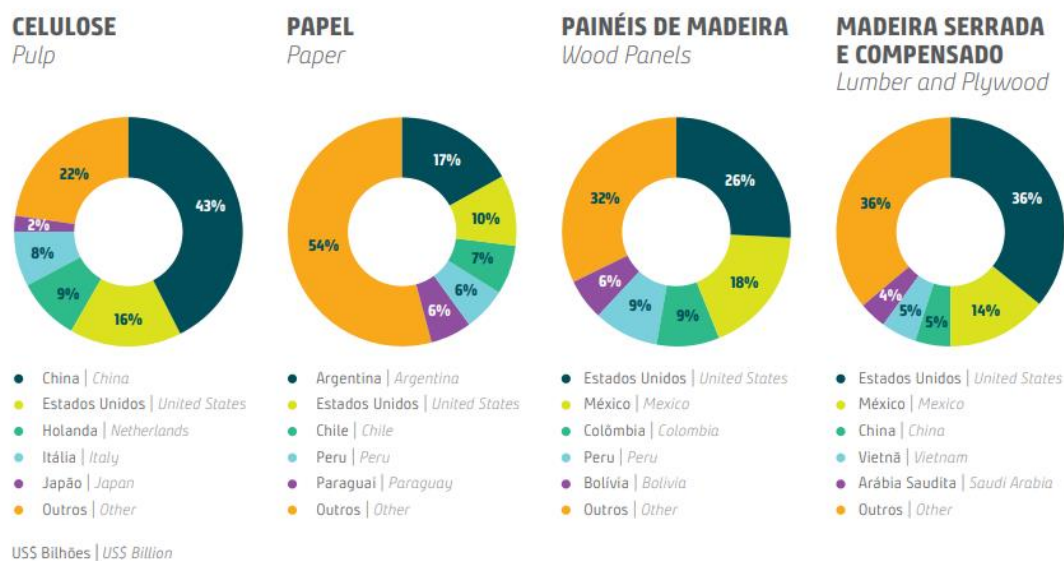
2.1 Panorama do setor florestal brasileiro

O Brasil é o primeiro país do mundo com a maior extensão de floresta tropical e o segundo com a maior cobertura florestal, perdendo apenas para a Rússia; segundo o ministério do meio ambiente, estima-se que 69% dessa área tem potencial produtivo (SNIF, 2020). Também segundo o SNIF (2020), o setor florestal possui suma importância, pois não atende apenas o setor energético, mas também a construção civil e a indústria moveleira mundial.

Além disso, sua importância econômica se justifica, pois, segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020), no ano de 2019, este setor movimentou cerca de 1,2% do PIB Nacional, correspondente a uma renda bruta de R\$ 94,4 bilhões. As perspectivas apontam que até 2023 este setor deve criar mais de 36 mil empregos, sendo que ainda em 2019 gerou oportunidades para 3,75 milhões de pessoas de forma direta e indireta (IBÁ, 2020).

Atualmente, a produção do setor florestal se divide em celulose, papel, painéis de madeira, madeira serrada e compensado. A Figura 2 ilustra o quadro do setor florestal produtivo.

Figura 2 - Principais países aos quais os produtos florestais são exportados



Fonte: (adaptado de IBÁ, 2020)

Mesmo sendo de suma importância na economia nacional, é importante destacar que esse setor apresenta alguns comportamentos contraditórios, pois, ao mesmo tempo em que desenvolveu silvicultura e florestas plantadas, ainda sofre com o desmatamento ilegal das florestas nativas (SNIF, 2020).

Segundo os dados do IBÁ (2020), apenas em 2019, o total de áreas plantadas foram de cerca de 9 milhões de hectares, nos quais as espécies Eucalipto e Pinus foram as mais plantadas, correspondendo respectivamente a 6,97 milhões e 1,64 milhão, enquanto as outras espécies, como Acácia, Paricá, Teca e Seringueira, corresponderam a 0,39 milhão.

2.2 Painéis Aglomerados

2.2.1 Breve histórico e definições importantes

Nascimento, Lahr e Christoforo (2015) descrevem que os painéis aglomerados surgiram como uma proposta alternativa de uso devido à escassez de madeira na Segunda Guerra Mundial em 1941. Entre 1943 e 1944, duas empresas foram criadas com o intuito de utilizar o resíduo de serraria para a fabricação de painéis, além de desenvolverem as primeiras chapas para prensagem dos painéis.

Iwakiri (2005) relata que um dos motivos para o surgimento dos painéis aglomerados foi a necessidade de se utilizar resíduos provenientes da produção dos painéis compensados. Apenas depois de 1946 as indústrias voltaram o foco para painéis aglomerados nos Estados Unidos, sendo que somente entre as décadas de 1960 e 1970 ocorreu a expansão das fábricas e o avanço tecnológico com o objetivo de produzir painéis estruturais.

Investimentos em tecnologia e automação dos processos fizeram com que o Brasil se tornasse um destaque na fabricação de painéis de madeira reconstituída (GILIO, 2020). É importante destacar que, atualmente, a principal produtora de painéis MDP e MDF é a Indústria Masisa, com sua produção equivalente a 19% da capacidade instalada e está presente em diversos países, como Argentina, Brasil, Chile, México e Venezuela (ROCHA, 2016).

Segundo o *Food and Agriculture Organization* (FOA, 2020), os painéis produzidos com partículas de madeira são utilizados com materiais lenhosos e não lenhosos que objetivam possuir densidades iguais ou maiores que a espécie de origem. Para painéis não estruturais também se utiliza a casca das madeiras com o objetivo de minimizar os resíduos gerados.

Outra definição digna de destaque se encontra na literatura de Espósito (2007, p. 60):

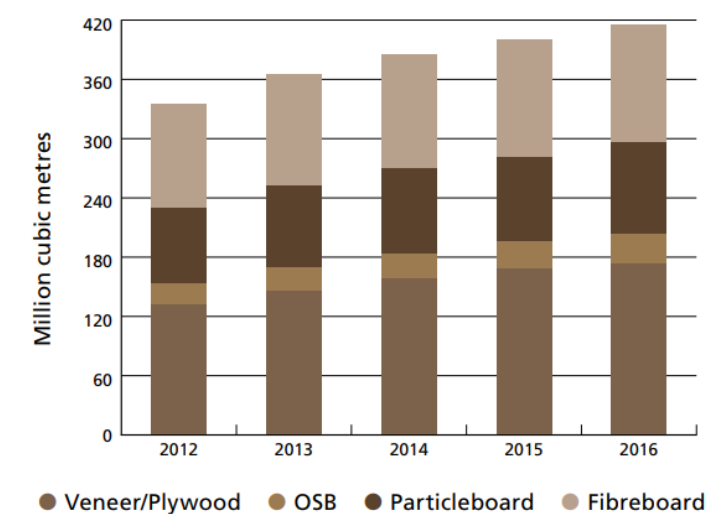
As chapas de madeira aglomerada são fabricadas com partículas de madeira ou outros materiais, aglutinados por meio de uma resina e, em seguida, prensados. Durante o processo de produção, são adicionados diversos produtos químicos para evitar o mofo, a umidade, o ataque de insetos e aumentar a resistência ao fogo.

Os painéis podem ser produzidos, dessa forma, com misturas de espécies de madeira, com adição de polímeros, resíduos agroindustriais, componente lignocelulósico ou resíduos madeireiros. Substituições e adições de produtos ao processo de produção objetivam melhorar as propriedades dos painéis, como também substituir o uso da madeira, procurando meios de produzir materiais mais ecológicos e reduzir o desperdício (GONÇALVES *et al.*, 2018).

2.2.2 Produção, Fabricação e Classificação dos painéis

Segundo a FAO (2016), a produção mundial dos painéis à base de madeira no respectivo ano alcançou um aumento significativo com relação a 2012 e, entre 2015 e 2016, o aumento foi de 4%; em 2016, o total de painéis produzidos foi de 416 milhões de m³. A figura 3 ilustra o aumento da produção de painéis a partir de 2012 até 2016.

Figura 3 - Produção de painéis à base de madeira – Compensado, OSB, Aglomerado e MDF



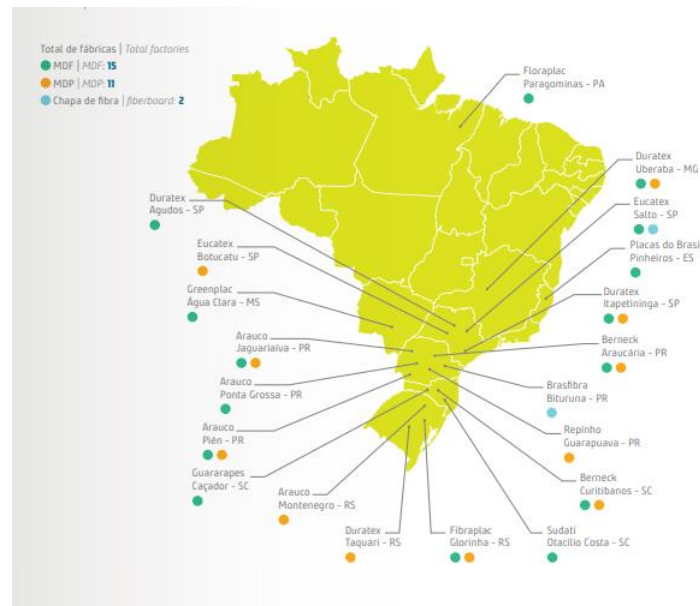
Fonte: adaptado de FAO (2016)

O consumo dos produtos derivados relaciona-se à cultura de cada região, sendo os painéis compensados utilizados predominantemente na região asiática-pacífica, principalmente na China, enquanto o OSB, Aglomerado e MDF são utilizados principalmente na América do Norte e na Europa (FAO, 2016).

Atualmente, as principais empresas que dominam o mercado de painéis à base de madeira no Brasil são as Indústrias: Arauco S/A, Berneck S/A Painéis e Serrados, Berneck A Marca da Madeira, Eucatex S/A Indústria e Comércio, Fibraplac Tecnologias em Painéis e Masisa Mais Confiança (NASCIMENTO; LAHR; CHRISTOFORO, 2015). Também de acordo com esses autores, o Brasil detém apenas 2% da produção de painéis particulados, sendo que a Alemanha (17%) e os Estados Unidos (14%) são os principais produtores.

Segundo Rocha (2016), para a produção de painéis de madeira reconstituída, a Duratex, empresa do ramo e instalada majoritariamente na região sul e sudeste, utiliza madeira certificada, de forma a manter o controle da qualidade de seus produtos. A Figura 4 ilustra a distribuição das empresas produtoras de painéis no Brasil.

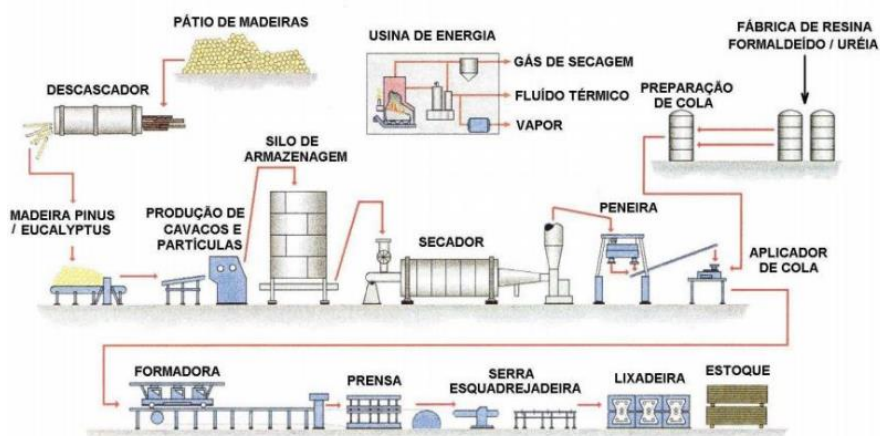
Figura 4 - Distribuição de empresas de painéis (MDP, MDF e Chapa de Fibra)



Fonte: adaptado de IBÁ (2020)

Independente de qual seja a empresa em questão, o processo básico de fabricação dos painéis de madeira aglomerada atende à descrição realizada por Iwakiri (2005), a qual envolve a remoção da casca, a preparação e a geração das partículas, a classificação, a secagem, a aplicação de adesivos e aditivos químicos, a formação do colchão, a pré-prensagem, a prensagem quente, o resfriamento/acondicionamento, o acabamento, a classificação do painel, a embalagem e, enfim, o armazenamento, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Cadeia produtiva dos painéis aglomerados



Fonte: Adaptado de IWAKIRI (2005).

De acordo com a NBR 14810-2 da ABNT (2018), os painéis de partículas de média densidade são classificados em seis tipos, conforme os valores informam na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas informados pela norma NBR 14810-2 e suas classificações

NBR 14810-2 (ABNT, 2018)					
Classificação	I 24 (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T. P (MPa)
P2	22	5-13%	11	1.800	0,40
P3	17	5-13%	15	2.050	0,45
P4	16	5-13%	16	2.300	0,40
P5	11	5-13%	18	2.550	0,45
P6	16	5-13%	20	3.150	0,60
P7	10	5-13%	22	3.350	0,75

Fonte: Elaborado pelo autor

Na qual:

- i. P2 - Painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
- ii. P3 - Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- iii. P4 - Painéis estruturais para uso em condições secas;
- iv. P5 - Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- v. P6 - Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições secas;
- vi. P7- Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas;

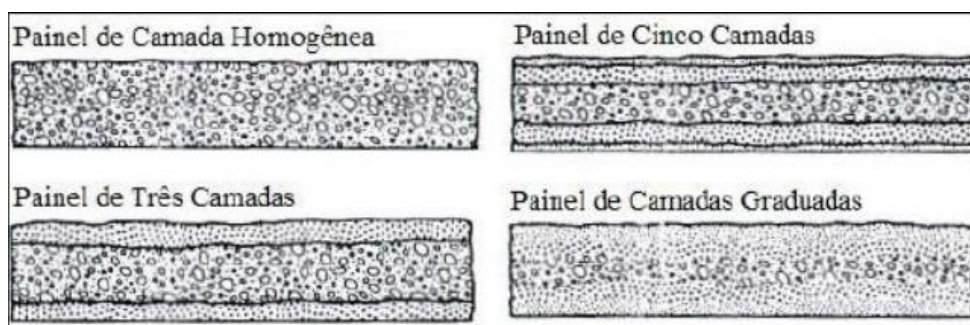
Essa classificação é definida em função da caracterização física e mecânica dos painéis, independente se estes foram produzidos com resíduos ou com matéria prima oriunda de madeiras de florestas plantadas.

Iwakiri (2005), em seus estudos, apresenta uma classificação em função da densidade dos painéis, ou seja, painéis de baixa densidade se constituem com até $0,590 \text{ g/cm}^3$, média densidade com $0,590$ a $0,800 \text{ g/cm}^3$ e alta densidade com valor acima de $0,800 \text{ g/cm}^3$.

As características das partículas também influenciam na classificação do painel, sendo o aglomerado convencional produzido com partículas “silver”, o *flakeboard* com partículas do tipo “flake”, o *waferboard* com partículas do tipo “wafer” e o *strandboard* com partículas do tipo “strand” (IWAKIRI, 2005).

Ainda segundo Iwakiri (2005), os painéis são diferenciados de acordo com a distribuição das partículas. Os painéis homogêneos se caracterizam por suas partículas estarem distribuídas aleatoriamente por todo o painel, os painéis de múltiplas camadas (também chamados de heterogêneos) se caracterizam por apresentarem uma diferenciação entre suas camadas a partir da granulometria. Os painéis de camadas graduadas, por sua vez, possuem uma graduação na qual não é possível distinguir a divisão das camadas e, enfim, os de partículas orientadas são painéis com partículas com uma direção principal pré-estabelecida, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Distribuição de partículas ao longo do painel



Fonte: Adaptado de Moslemi (1974)

Outra definição importante para painéis aglomerados ou chapas de madeira aglomerada diz que esse material é estruturalmente formado em três camadas, sendo a camada interna também chamada de C1, a qual possui

partículas maiores, e as camadas externas CE, formadas com partículas menores, que possuem o objetivo de dar maior resistência à ligação adesiva da camada interna e melhor acabamento superficial (IWAKIRI, 2003).

Uma pesquisa realizada por Iwakiri *et al.* (2012) comparou duas espécies (*Melia azedarach* e *Pinus taeda*) com duas formas diferentes de produzir painéis aglomerados. Uma delas utiliza a metodologia dos painéis homogêneos e outra a metodologia para chapas de três camadas (heterogêneos), sendo 8% do teor de adesivo fixo para painéis homogêneos e, para o de três camadas, variando entre 6, 8 e 10% entre as camadas internas e externas, com partículas retidas na malha de 8 e 30 *mesh* para CE para os painéis aglomerados homogêneos, enquanto para CI dos painéis de três camadas a variação ficou em torno de 6 e 8 *mesh*, obtendo a proporção 20/60/20 entre as camadas.

Por conseguinte, o estudo concluiu que, com o aumento do adesivo ureia-formaldeído nas camadas internas e externas das chapas aglomeradas, os resultados de inchamento e absorção obtiveram uma melhora significativa, enquanto as propriedades mecânicas não foram diretamente afetadas pelo aumento da resina. Outra importante conclusão é que, mesmo utilizando uma única espécie de madeira, para este caso, a reestruturação do painel homogêneo para três camadas não alterou de forma significativa as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Bueno (2015), em sua pesquisa, também comparou as duas metodologias de produção dos painéis aglomerados. Para as chapas de três camadas, utilizou-se da proporção entre as partículas de 10/80/10 para a montagem, sendo as partículas da camada externa de bagaço de cana de açúcar, variando entre 0,3 e 1,0 mm, com 15% de adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona, e, para camada interna, com fibra da casca do coco com intervalo de partículas entre 1,0 a 4,0 mm. Esta mesma faixa granulométrica e o mesmo material foram usados para produzir os painéis homogêneos com 12% de adesivo para ambos os tratamentos.

Ainda sobre esta última pesquisa, o autor conclui que a configuração multicamada apresentou um desempenho físico-mecânico superior às chapas de partículas homogêneas, além de que, através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), o autor também pode observar uma maior quantidade de

poros nas chapas aglomeradas homogêneas, quando comparadas aos painéis de três camadas, justificando maiores valores de IE (inchamento em espessura) e AA (absorção em água) e menores valores de MOR (módulo de resistência à flexão estática) e MOE (módulo de elasticidade).

2.2.3 Principais fatores que influenciam nas propriedades dos painéis

2.2.3.1 Densidade

Um dos requisitos mais importantes na produção de painéis é que a densidade da madeira seja baixa, pois a razão de compactação, isto é, a relação da densidade do painel sobre a densidade da madeira, precisa ser em torno de 1,3, obtendo-se assim a densificação necessária do painel (IWAKIRI, 2005).

Araújo *et al.* (2019) recomendam que o fator de compactação esteja no intervalo de 1,3 a 1,6, pois o aumento do fator de compactação pode gerar aumento de suas propriedades mecânicas e uma diminuição nas propriedades físicas. Quanto mais densa a madeira, mais espessas serão as paredes celulares, o que dificulta a mobilidade do adesivo na estrutura lenhosa, proporcionando assim uma ligação mais superficial da madeira com o adesivo e, conseqüentemente, mais fraca. (TRIANOSKI *et al.*, 2015).

A densidade também influencia de forma significativa nas propriedades dos painéis e em seu processo de produção. Espécies de baixas densidades poderão propiciar maior módulo de elasticidade, adesão interna, resistência a flexão, e melhor qualidade de colagem (ARAÚJO *et al.*, 2019).

Um estudo realizado por Brito *et al.* (2020), utilizando colmo de bambu e bagaço de cana de açúcar, constatou que, ao se aumentar a razão de compactação, a estabilidade do painel ficou prejudicada. Por esses meios, com o aumento gradual da razão de compactação, a resistência à flexão estática (MOR) e o arrancamento de parafuso aumentaram, enquanto a resistência ao inchamento e à absorção do painel diminuíram. Enfim, outro fator importante de se ressaltar é que, com o aumento da razão de compactação, o material sofreu uma maior perda devido ao ataque de fungos (BRITO *et al.*, 2020).

2.2.3.2 Geometria e umidade das partículas

Além de influenciar no fator de compactação e nas propriedades gerais dos painéis, a geometria das partículas depende da umidade com a qual a madeira será processada.

Na literatura de Iwakiri (2005), o autor ressalta que a madeira com umidade abaixo de 35% dificulta o controle da geometria das partículas, já que a madeira produz um maior volume de “finos”, acarretando também um maior consumo de energia. Em contrapartida, o processamento da madeira em umidade saturada provoca o seu esmagamento, além de obstrução das facas e aumento do tempo de secagem do material (IWAKIRI, 2005).

Um trabalho realizado por Klímek *et al.* (2016), usando Girassol (*Helianthus annuus L.*), Tupinambo, (*Helianthus tuberosus L.*) e Planta Copo (*Silphium perfoliatum L.*) constatou a hipótese de que, utilizando os mesmos procedimentos de preparação para todos os materiais citados acima, cada espécie forneceu uma geometria diferente, tanto em produtos madeireiros quanto em não madeireiros.

Uma descoberta geral é que partículas mais "cúbicas" têm um efeito positivo na ligação interna, enquanto MOE e MOR se beneficiam com partículas mais alongadas (MIYAMOTO *et al.*, 2002; ARABI *et al.*, 2011). Segundo Abdul Khalil *et al.* (2010), a rigidez à flexão das fibras está intimamente ligada à sua extensibilidade, uma vez que há flexão e tração em uma face e compressão na outra.

Também segundo Albuquerque (2002), painéis com partículas mais finas garantem uma melhor estabilidade na espessura, a menor massa do material garante melhor dispersão do inchamento higroscópico e aumento do número de interfaces partícula-partícula.

2.2.3.3 Teor de extrativos e acidez

A constituição química principal da madeira se baseia em lignina, poliose e celulose, com extrativos e substâncias inorgânicas (cinzas) em menor quantidade (RAZERA, 2006). Ainda segundo Razera (2006), os extrativos são produzidos no cerne e estão relacionados com a redução da permeabilidade e

higroscopicidade da madeira. A alta concentração de extrativos pode ocasionar interação negativa com o adesivo, prejudicando o processo de cura e aumentando o tempo de prensagem do painel (RAZERA, 2006).

Iwakiri (2005) também constata que as quantidades de extrativos presentes na madeira variam entre 5 a 30%, e que qualquer problema relacionado ao excesso de extrativo precisa ser identificado e controlado. Quanto menor for a concentração de extrativo, maior será a interação do material com o adesivo. A seringueira, por exemplo, é uma espécie que possui menor teor de extrativos quando comparada com as outras espécies (GAVA *et al.*, 2015).

A acidez é outra característica relacionada com a cura da resina e a escolha do tipo de catalisador necessário para se produzir o aglomerado. O nível de acidez é medido por pH, enquanto a resistência da madeira para mudar de pH se chama capacidade tampão (IWAKIRI, 2005). Segundo Razera (2006), o pH varia entre espécies, estando normalmente entre 3 e 6; em função da migração do extrativo das camadas internas para as externas, pode ocorrer uma mudança significativa no pH dentro da mesma espécie de madeira, alterando, assim, as propriedades de colagem do adesivo.

2.2.3.4 Teor de umidade

A variação do teor de umidade depende do tipo de resina a ser utilizada na produção dos painéis aglomerados. O teor de umidade também influencia no tipo de madeira a ser selecionada, no tempo de prensagem e na espessura das partículas (NASCIMENTO; LAHR; CHRISTOFORO, 2015). Segundo Iwakiri (2005), o teor de umidade também exerce influência na cura da resina e na pressão necessária para a produção do painel.

Na indústria, as partículas, antes de serem secas, costumam apresentar umidade variando entre 35% a 120%, podendo alcançar teores finais de 3% a 6% (NASCIMENTO; LAHR; CHRISTOFORO, 2015). Entretanto, partículas com alto teor de umidade final podem ser problemáticas, pois propiciam a formação de bolhas de vapor durante a prensagem dos painéis (IWAKIRI, 2005).

O teor de umidade também é importante, pois, quando ocorre a vaporização da umidade das camadas superficiais, esse vapor migra para o interior do painel, fazendo com que a resina consiga fluir mais facilmente (ZAMARIAN, 2016).

2.2.3.5 Pressão, tempo e temperatura de prensagem

A principal função da pressão é a consolidação e a densificação do material até que ele atinja a espessura projetada. A variação da pressão fica na faixa de 12 a 40 kgf/cm² (1,18 a 3,92 MPa), em função da densificação do material. É necessária, porém, a manipulação da pressão com o objetivo de evitar estouro dos painéis com a abertura da prensa (IWAKIRI, 2005).

O tempo de prensagem precisa ser suficiente para que a resina cure e que a umidade migre e se libere na forma de vapor através das bordas do painel. O tempo de prensagem é definido variando de 6 a 12 segundos por milímetro de espessura dos painéis (IWAKIRI, 2005).

Conforme descrito por Iwakiri (2005), a temperatura para prensagem dos painéis possui a função de propiciar a polimerização e cura da resina e a plasticização da madeira, facilitando a compressão das partículas para consolidação do painel e, conseqüentemente, a definição da espessura final.

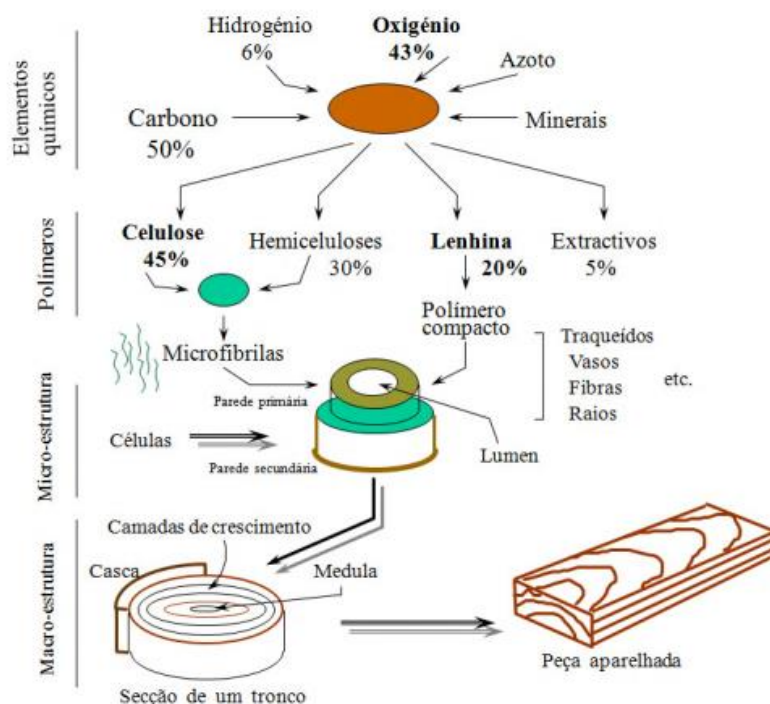
2.3 Madeiras

A madeira é um material de origem biológica que possui, na sua constituição principal, matéria anisotrópica e heterogênea. São dois os grupos que se enquadram as espécies de madeira, sendo uma denominada Coníferas ou madeiras resinosas, e outra Dicotiledônias, popularmente conhecidas como folhosas, sendo essas as árvores madeireiras, ou seja, aquelas com elementos e estrutura lenhosa capazes de produzir madeira (PEREIRA, 2009).

Segundo Santos (2007), a madeira é idealizada como um polímero fibroso com microfibras de celulose em sua matriz constituída, que possui lignina e hemicelulose, definidos como compostos amorfos de cadeias curtas ou ramificadas. Ainda segundo Santos (2007), a lignina se assemelha a um cimento biológico que se compara com a interação entre resistência à tração

do aço com a resistência à compressão do concreto. Quando analisadas a celulose e a lignina juntas, estas possuem um comportamento semelhante ao do concreto armado, correspondendo, nesse caso, à ação das microfibras de celulose ao aço e à ação da lignina com o concreto.

Figura 7 - Exemplo da constituição química da madeira e sua estrutura



Fonte: Adaptado de Santos (2007)

A composição química das partículas desempenha um papel importante no desempenho físico e mecânico dos painéis aglomerado. Segundo Pirayesh e Khazaeian (2012) e Ayrilmis *et al.* (2009), a celulose e a hemicelulose possuem um grande número de grupos hidroxilas, sendo elas responsáveis pela ligação do material com os adesivos poliméricos polares.

O menor teor de holocelulose (celulose e hemicelulose) presente nos resíduos agrícolas, por exemplo, pode ser a razão pela qual a ligação entre essas partículas é restrita e, conseqüentemente, há uma redução nas propriedades mecânicas com esses materiais (KLÍMEL *et al.*, 2016).

Segundo Achyuthan *et al.* (2010), a lignina como um polímero amorfo constituinte nas paredes celulares é mais hidrofóbica, de forma que torna as plantas menos acessíveis à água. Sendo assim, um menor teor de lignina

encontrado nas partículas pode ocasionar uma maior absorção de água (NOURBAKHS; BAGHLANI; ASHORI, 2011). Porém essas relações complexas entre a composição química (celulose, lignina) e outras propriedades dos painéis de partículas ainda não são totalmente compreendidas (KLÍMEL *et al.*, 2016).

Alguns autores, como Silveira, Rezende & Vale (2013), Coradin *et al.* (2010), Vale, Sarmiento & Almeida (2005) e Vale, Brasil & Leão (2003), classificam a densidade básica da madeira como de baixa densidade < 0,550 g/cm³, madeiras de média densidade quando os valores encontrados estão entre 0,550 e 0,720 g/cm³ e alta densidade para valores acima de 0,730 g/cm³.

Maloney (1993) afirma que as espécies mais adequadas para a produção de painéis são espécies com densidade em torno de 0,550 g/cm³, pois conseguem atingir uma razão de compactação em torno de 1,3 a 1,6, valores considerados ideais para a consolidação e a densificação do painel.

De modo geral, as coníferas são as mais utilizadas na produção de painéis devido à sua baixa densidade. Em relação às madeiras de média densidade, é interessante que sejam usadas desde que se misturem com as espécies de baixa densidade. No Brasil, a espécie mais utilizada é o Pinus (IWAKIRI, 2005).

2.3.1 *Eucalyptus urophylla* (Eucalipto)

O *Eucalyptus urophylla* S.T Blake, conhecido antigamente como *E. alba* e a espécie como *E. platyphylla*, é uma espécie originária da Indonésia que ocorre na costa de Timor, com altitude variando de 500 a 3.000m. Essa espécie se caracteriza por possuir densidade média, cerne rosa e marrom, clara, sendo principalmente utilizada para painéis, celulose, serraria, postes, fibra, carvão e dormentes (MOURA, 2004).

Segundo Sugaraha (2018, p. 33), “espécies do gênero *Eucalyptus* surgiram como alternativa de uso diante da dificuldade cada vez maior de se obter madeira oriunda de florestas nativas, devido principalmente, ao seu rápido crescimento”. E, de acordo com Ferreira (1997), há grande interesse no *E. urophylla*, pois é uma espécie para climas tropicais, nos quais ocorreu uma melhor adaptação e desenvolvimento produtivo da árvore.

No Brasil, o Eucalipto é a espécie de madeira exótica mais plantada, ocupando uma área acima de 4,75 milhões de hectares (PALUDZYSZYN FILHO & SANTOS, 2011). Segundo os autores Alzate (2004) e Mora & Garcia (2000), as espécies mais utilizadas em todo mundo são: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus camaldurensis*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*.

Ribeiro & Filho (1993) estudaram a densidade básica de 5 espécies de Eucaliptos proveniente de quatro regiões diferentes de São Paulo, constatando que a espécie *Eucalyptus urophylla* possui densidade básica superior a 0,510 g/cm³.

Ferreira, Freitas e Ferreira (1979), por sua vez, estudaram a densidade básica da madeira dos *Eucalyptus urophylla*, híbrido no município de Rio Claro, com 7 e 8 anos de idade, que se apresentaram com 0,516 g/cm³ e 0,534 g/cm³, respectivamente. Mendes *et al.* (2014) produziram painéis aglomerados de baixa densidade com clones de *Eucalyptus urophylla*, obtendo a densidade básica da madeira variando entre 0,520 a 0,650 g/cm³.

Hsing, Paula e Paula (2016) estudaram as características químicas de híbridos entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, obtendo uma média de 49,04% de lignina, 71,15% de holocelulose, 21,55% e 21,72% de lignina I e T, respectivamente, como também 6,45% de teor de extrativos e 3,39% de cinzas, sendo propriedades importantes para a relação madeira/adesivo.

Para comparação da densidade das partículas utilizadas para a produção das chapas, considerou-se os valores da densidade das espécies maciças, pois existem poucos valores encontrados na literatura referentes à madeira particulada.

2.3.2 *Pinus caribaea* var. *caribaea* (Pinus)

Segundo Silva *et al.* (2012), o Pinus é uma das espécies mais plantadas no mundo, sendo utilizada para a produção de celulose, papel e madeira serrada.

De acordo com Embrapa (2014, s/p),

A variedade *caribaea* é nativa do oeste de Cuba, em Pinar del Rio e Isla de La Juventud, em altitudes de até 280 m, com inverno seco, temperatura média anual variando de 5 °C a 25 °C, [...] e solos ácidos (pH 4,5 a 6,0).

Dessa forma, mesmo sendo ideal para regiões quentes, a variedade *caribaea*, assim como a variedade *bahamensis*, possui baixa produção de sementes, o que dificulta a sua difusão nos setores florestais (EMBRAPA, 2014).

O *Pinus caribaea* ramifica-se em três variedades (*bahamensis*, *caribaea* e *hondurensis*), sendo constituído de grande quantidade de resina, ideal para o processamento mecânico. A *hondurensis* é a variação mais plantada na região tropical no Brasil (EMBRAPA, 2014).

As espécies que melhor se adaptaram no solo paulista, no cerrado, com primaveras e invernos secos e solos pobres, foram os *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, *Pinus kesiya* e *Pinus oocarpa* (SILVA, 2012). Dentre as espécies de pinus tropical, a única que cresce em regiões de baixa altitude é o *Pinus caribaea* var. *caribaea* (FRANCIS, 1992).

A madeira da espécie de *Pinus caribaea* var. *caribaea* tem uma estrutura denominada “grosseira”, com fibras verticais, coloração marrom amarelada ou marrom avermelhada, lenho outonal e anéis de crescimento largos; o cerne da árvore não se forma até a idade de 15 anos (WANG *et al.*, 1999).

Poucos materiais são encontrados utilizando essa espécie em específico, mas estudos realizados por Iwakiri *et al.* (2010) determinaram a densidade da madeira *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Pinus caribaea* var. *bahamensis* em torno de 0,398 e 0,429 g/cm³, respectivamente. Outro estudo realizado por Wang *et al.* (1999) constatou que a densidade básica do *P. caribaea* var. *caribaea* constava em torno de 0,470 e 0,580 g/cm³, com espécies nas idades de 10 e 15 anos.

Silva Júnior (1993) analisou a densidade básica da espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de três formas diferentes. A primeira densidade foi calculada como resíduo de serraria, a segunda densidade foi retirada do miolo da madeira maciça enquanto a terceira, do topo, com densidades de 0,624; 0,449 e 0,505 g/cm³, respectivamente.

2.3.3 *Havea brasilienses* (Seringueira)

Oriunda da Amazônia, a árvore *Havea* possui mais de 11 espécies, sendo uma planta de clima tropical úmido, existindo principalmente nas regiões de várzeas inundáveis e solos que margeiam rios (EMBRAPA, 2021). *Havea Brasiliensis*, popularmente conhecida como Seringueira, é a árvore que produz o látex, matéria prima para a fabricação da borracha natural (EUFRADE JUNIOR *et al.*, 2015).

Os seringais paulistas são os mais produtivos do Brasil, sendo que, para a fabricação de borracha natural, é necessária pouca energia, além de as árvores fazerem o papel de captar o CO₂ no meio ambiente, minimizando os problemas causados pelo efeito estufa (IAC, 2012).

Segundo Eufrade Junior *et al.* (2015), terminado o ciclo de produção e extração do látex, que dura em torno de 25 a 30 anos, a Seringueira se torna uma fonte de baixo custo quando utilizada em fins energéticos. Estudos recentes vêm trazendo a proposta de utilização dessa espécie para outros fins, como nas indústrias moveleira, madeireira e de painéis derivados de madeira, criando uma fonte opcional de renda para os produtores de látex (MÜZEL *et al.*, 2015).

Um dos problemas da utilização da Seringueira se dá pelo fato de esta espécie não possuir cerne, tornando-a sensível a ataques de fungos e insetos, possuindo também um alto teor de amido e açúcares (GONÇALVES, 2002). Ainda segundo Gonçalves (2012), a existência de tração, que ocasiona contrações na árvore, limitam a utilização dessa espécie; ressalta-se, ainda, que a ocorrência de tração nessa espécie é um fenômeno natural desconhecido.

A madeira de Seringueira se caracteriza por ter coloração branca e creme clara, passando para marrom clara, a madeira é dura e leve, possuindo textura grossa ou moderadamente grossa, sua densidade varia de acordo com a sua idade, sendo o intervalo de 0,480 a 0,650 g/cm³ (LIM; GAN; CHOO, 2003). Devido à sua coloração atraente, a tora de seringueira já foi utilizada em pisos,

móveis, componentes de escada e utensílios domésticos (JULIANA; PARIDAH; ANWAR, 2012).

Oliveira Junior (2011), em sua pesquisa, determinou a densidade da espécie de *Havea brasilienses*, na fase adulta, com três umidades diferentes (37, 12 e 0%), obtendo valores de densidade 0,778; 0,658 e 0,615 g/cm³ sem painel, respectivamente. Leonello (2011) estudou a densidade básica nos discos de dois clones diferentes (GT1 e RRIM600), obtendo valores de 0,594 e 0,581, respectivamente, com a árvore sadia.

Ainda segundo os estudos de Oliveira Junior (2011), o autor determinou a porcentagem de holocelulose, lignina e extrativos para a mesma espécie em duas idades diferentes, sendo os valores encontrados na fase adulta 74,01; 17,06 e 7,31%, respectivamente.

2.3.4 *Tectona grandis* (Teca)

Conhecida popularmente por Teca, a *Tectona grandis*, natural das florestas tropical asiáticas, de grande porte, pode chegar a 60 metros, sendo mais comumente utilizada em construção naval devido à sua alta resistência à ação da água do mar, à chuva, ao frio e ao calor (FIGUEIREDO; SÁ, 2015).

O plantio de Teca no Brasil se deu por volta da década de 60, através da empresa Cárceres Florestal S/A, município de Cárceres, no estado do Mato Grosso, onde a região possui condições semelhantes às dos países de origem, ou seja, algumas condições climáticas, atreladas à alta fertilidade do solo e aos tratamentos silviculturais adequados, possibilitaram a redução do tempo de cultivo da árvore de 80 para 25 anos (COSTA, 2011).

Além de possuir boas propriedades físicas, a madeira de Teca se caracteriza por ser de boa estabilidade dimensional, dureza média, fácil trabalhabilidade e boa resistência mecânica (PAES *et al.*, 2015). Além da construção naval, essa espécie também é utilizada para estruturas, pisos, móveis, chapas, postes, entre outros (CARDOSO, 1991; FINGER *et al.*, 2004).

A madeira Teca possui um alburno estreito e claro, sendo uma região bem distinta do cerne, este que possui coloração marrom brilhante (PIMENTEL *et al.*, 2008). A presença de caucho, espécie de látex no cerne da Teca, e tectoquinona, um preservativo natural contido nas células da madeira, garante

para a espécie alta durabilidade natural e alta estabilidade dimensional, além de possuir baixa absorção de água (GARCIA; MARINONIO, 2016).

Além dos benefícios supracitados, esta espécie é considerada imune ao ataque de insetos e de fungos apodrecedores, podendo ser utilizada em ambientes marítimos, exposta ao tempo e enterrada, sem assim sofrer grandes danos (MOTTA *et al.*, 2013).

Uma pesquisa realizada por Souza (2019) analisou o teor de extrativo, o teor de lignina total e o teor de holocelulose da espécie *Tectona grandis*, proveniente de três sítios diferentes do Estado do Mato Grosso, obtendo valores variando de 6,97% a 9,94%; 30,96% a 32,69% e 66,57% a 69,03%, respectivamente.

Segundo Garcia e Marinonio (2016), a Teca é moderadamente pesada e dura, com densidade variando entre 0,440 g/cm³ e 0,820 g/cm³, sendo uma madeira de boa trabalhabilidade que apresenta bom comportamento na secagem. De acordo com Flórez (2012), a densidade básica em média da Teca é de cerca de 0,550 g/cm³, enquanto dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2021) apontam o valor sendo 0,660 g/cm³.

2.4 Resíduos madeireiros na fabricação dos painéis

Qualquer empresa que trabalhe com madeira gera resíduo, consequência dos processamentos primário e secundário da madeira (CERQUEIRA, 2012). Segundo Fontes (1994), os resíduos oriundos desses processamentos podem ser classificados em cavacos (partículas de dimensões máximas de 50 a 20 mm, geradas através de moinhos), maravalhas (resíduo com dimensão inferior a 2,5 mm), serragem (com dimensões variando de 0,5 a 2,5 mm), pó (resíduos menores que 0,5 mm) e lenha (resíduo de grandes dimensões, aparas e resíduos de topo de tora).

De acordo com Finotti (2006), as perdas no desdobro e nos cortes de reserra da madeira variam entre 20% a 40% do volume total das toras utilizadas no processamento. Os resíduos de madeira são utilizados na geração de energia elétrica, de biomassa para produção de MDF e aglomerado, como também na forração de granjas, currais e baias (CASSILHA, 2004).

Uma alternativa para utilização do resíduo madeireiro é a aplicação em brinquedos e a compostagem, sendo o primeiro necessário que se escolha as espécies corretamente para que os extrativos presentes na madeira não prejudiquem a saúde dos usuários (GOMES; SAMPAIO, 2004).

Não é de hoje que é considerada a utilização de resíduos madeireiros para se fazer painéis, alguns autores (FARIA *et al.*, 2020; SILVA, 2018; IWAKIRI, 2017; SAM-BREW, 2017; NASCIMENTO, 2016; FIORELLI, 2015; CHRISTOFORO, 2015) já realizaram pesquisas com essa temática, variando as espécies de madeira, temperatura, teor de resina entre outros parâmetros que visam melhorar ou atribuir melhores propriedades para os painéis confeccionados.

2.4.1 *Eucalyptus urophylla* (Eucalipto)

Os parâmetros utilizados para a escolha das literaturas comparativas para os resultados encontrados no presente estudo se basearam em selecionar pesquisas e artigos que utilizaram a mesma espécie de madeira, ou do mesmo gênero, e pesquisas que utilizaram maravalhas ou resíduos de madeiras para produzir painéis. Levou-se também em consideração a organização do painel, além do adesivo empregado e os parâmetros de prensagem e densidade.

Para a fabricação de painéis, Silva *et al.* (2020) estudaram a utilização da maravalha de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na forma integral, sem caracterização granulométrica, confeccionando painéis de média e alta densidade e utilizando três tipos de resinas diferentes: quatro misturas com dois tipos de poliuretanas e duas misturas com ureia formaldeído, utilizando como parâmetros de produção umidade em torno de 12 e 15% de adesivo em relação à massa seca, pressão de 3,5 MPa por 10 minutos e aglutinados com PUR à temperatura de prensagem de 100 e 120°C para UF (ureia formaldeído).

Tabela 2 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Silva *et al.* (2021)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Maravalha de Eucalipto	15	PUR	0,720	5,92	-	-	20,00	1.796	1,61
100% Maravalha de Eucalipto	15	PUR	0,730	7,85	-	-	18,50	1.880	1,71
100% Maravalha de Eucalipto	15	UF	0,700	16,12	-	-	13,17	1.639	1,25

Fonte: Silva *et al.* (2021).

Faria *et al.* (2020) utilizaram tábuas de *Eucalyptus grandis* para a realização de painéis aglomerados de média densidade com maravalhas. As partículas possuíam uma faixa granulométrica variando de 9,5 a 16mm, o adesivo utilizado foi à base de fenol formaldeído variando a porcentagem de adesivo em relação ao peso seco (6%, 9% e 12%), a pressão utilizada foi de 3,92 MPa durante 8 minutos e se empregou a temperatura de 160°C, obtendo os seguintes valores:

Tabela 3 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Faria *et al.* (2020)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Maravalha de Eucalipto	6%	FF	0,618	22,75	109,58	8,93	3,27	385,83	0,13
100% Maravalha de Eucalipto	8%	FF	0,629	13,09	97,47	9,60	4,88	637,53	0,21
100% Maravalha de Eucalipto	12%	FF	0,624	8,08	81,79	9,50	7,27	932,86	0,38

Fonte: Faria *et al.* (2020).

Pierre, Ballarin e Palma (2014) realizaram estudos com *Eucalyptus grandis* e resíduos industriais madeireiros (serragem e paletes). O painel aglomerado foi confeccionado com três camadas, com variação de 10% a 35% por peso do resíduo, empregando ureia formaldeído com 7,5% de adesivo na camada interna e 9,5% na camada externa. A pressão de prensagem utilizada foi de 3,3 MPa, com 3,2s para cada mm de camada, utilizando uma temperatura variando de 140°C a 198°C.

Tabela 4 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Pierre, Ballarin e Palma (2014)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100T (100% torretes de eucalipto)	7,5% em relação à base peso seco das partículas na camada interna e 9,5% na camada externa	UF	0,650	-	-	9 - 12,5%	-	-	-

Fonte: Pierre, Ballarin e Palma (2014).

Estudos desenvolvidos por Bianche *et al.* (2012) produziram painéis com misturas de *Eucalyptus urophylla* e *Sidas* sp (fibra de vassoura), e também com *Eucalyptus urophylla* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá), na proporção de 25%, 50% e 75% de fibra de vassoura e Paricá em comparação com o Eucalipto. Foram utilizados dois teores de ureia formaldeído (6% e 8%), prensados com 3,2 MPa, por 8 minutos, a 170°C, conforme visto na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Resultado dos painéis de Eucalipto realizados no estudo de Bianche *et al.* (2012)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Eucalipto	6 e 8%	UF	0,630	33,54	57,62	9,53	10,88	1.383,81	0,37

Fonte: Bianche *et al.* (2012).

2.4.2 *Pinus caribaea var. caribaea (Pinus)*

Para a produção de painéis do gênero *Pinus*, Silva *et al.* (2020) também estudaram a utilização da maravalha de *Pinus elliot* e *Pinus taeda* na forma integral, avaliando 6 misturas diferentes com os mesmos procedimentos descritos para painéis com Eucalipto supracitados, com umidade do material em torno de 12%, 15% de adesivo em relação à massa seca, pressão de 3,5 MPa por 10 minutos e temperatura de prensagem de 100°C para PUR e 120°C para UF.

Tabela 6 - Resultado dos painéis de *Pinus* realizados no estudo de Silva *et al.* (2021)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Maravalha de <i>Pinus</i>	15%	PUR	0,740	11,42	-	-	17,00	1.462	2,18
100% Maravalha de <i>Pinus</i>	15%	PUR	0,670	9,78	-	-	16,67	1.369	1,73
100% Maravalha de <i>Pinus</i>	15%	UF	0,750	9,75	-	-	15,83	1.665	1,08

Fonte: Silva *et al.* (2021).

Cabral *et al.* (2017) realizaram estudo utilizando maravalha de *Pinus ssp.* e fibra de Sisal, confeccionando painéis de baixa densidade, nas proporções de 25%, 50% e 75% na relação *Pinus/Sisal*. Foi utilizado 12% do adesivo de PUR em relação à massa seca, com painéis prensados à temperatura de 100°C, com pressão de 5 MPa por 10 minutos.

Tabela 7 - Resultado dos painéis de Pinus realizados no estudo de Cabral *et al.* (2017)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Pinus ssp	12%	PUR	-	11,77	100,45	-	8,73	1.266,72	-

Fonte: Cabral *et al.* (2017).

Outra pesquisa utilizando madeira Pinus em forma de resíduo foi realizada por Iwakiri *et al.* (2017), que produziram painéis com resíduo de exploração florestal da espécie *Pinus taeda*. O material foi coletado na forma de galhos e ponteiros, tocos e raízes, sendo misturados em uma proporção de 75/25%, 50/50% e 25/75% para cada tipo de material com partículas de Pinus industrial, além de uma mistura em três partes iguais de cada material. Os autores adotaram uma densidade nominal de 0,750 g/cm³, com 8% de adesivo com base no peso seco, sendo prensados com uma temperatura de 160°C com 4 MPa durante 8 minutos, obtendo os valores informados na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Resultado dos painéis de Pinus realizados no estudo de Iwakiri *et al.* (2017)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Partículas de Pinus industrial	8%	UF	0,718	64,71	23,89	-	10,30	1.913	0,51
100% Tocos e raízes de Pinus	8%	UF	0,721	73,76	26,98	-	8,30	1.341	0,59
100% Topos e galhos das árvores de Pinus	8%	UF	0,715	51,49	18,85	-	6,90	1.154	0,59

Fonte: Iwakiri *et al.* (2017).

Por fim, Iwakiri *et al.* (2010) produziram e avaliaram painéis aglomerados com partículas de *Pinus carbaea* var. *carbaea* e *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, nas proporções de 100/0, 25/75, 50/50, 75/25 e 0/100%, respectivamente. Nesse estudo, foi utilizado 8% de adesivo ureia formaldeído em relação ao peso seco do material, sendo os painéis prensados à 160°C de temperatura, por 8 minutos, com pressão de prensagem de 4,0 MPa.

Tabela 9 - Resultado dos painéis de Pinus realizados no estudo de Iwakiri *et al.* (2010)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>caribaea</i>	8%	UF	0,687	31,34	88,93	-	16,73	2.326	1,07
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>bahamensis</i>	8%	UF	0,694	25,35	83,74	-	18,08	2.515	1,14

Fonte: Iwakiri *et al.* (2010).

2.4.3 *Hevea brasilienses* (Seringueira)

Para avaliação, Gilio *et al.* (2021) produziram painéis de média densidade com uma mistura entre duas espécies, *Hevea brasilienses* e *Tectona grandis*, na proporção 30/70%, respectivamente, utilizando dois teores de adesivo PUR sendo 5% e 10% em relação ao peso seco. As chapas foram prensadas com temperatura de 100°C, com pressão de 5,0 MPa por 10 minutos.

Tabela 10 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Gilio *et al.* (2021)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
30% Seringueira e 70% Teca	10%	PUR	0,720	10,49	-	7,97	18,60	2.468	1,06

Fonte: Gilio *et al.* (2021).

Estudos realizados por Faria *et al.* (2020) utilizaram a espécie *Hevea brasilienses* em diversas proporções com *Pinus oocarpa*, produzindo painéis de referência com 100% do material de cada espécie. A resina utilizada foi a UF,

com 8% de adesivo em relação à massa seca, sendo os painéis prensados a 160°C, por 8 minutos, com pressão de 4 MPa.

Tabela 11 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Faria *et al.* (2020)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Seringueira	8%	UF	0,525	12,75	99,74	7,42	9,87	1.054	0,56

Fonte: Faria *et al.* (2020).

Iwakiri *et al.* (2018) produziram painéis aglomerados de média densidade, utilizando seringueira e três tipos de eucaliptos (*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urograndis*), utilizou-se 8% de ureia formaldeído em relação à massa seca do material e 1% de emulsão de parafina, sendo os painéis prensados com pressão de 4,0 MPa, por 8 minutos, a uma temperatura de 160°C, os resultados estão dispostos na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Iwakiri *et al.* (2018)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Seringueira	8%	UF	0,751	35,55	76,77	-	14,5	2.205	0,78

Fonte: Iwakiri *et al.* (2018).

Gava *et al.* (2015) também produziram e avaliaram painéis homogêneos e heterogêneos com resíduo oriundo de *Hevea brasiliensis*, utilizando 12% de PUR em relação à massa seca das partículas. Para a montagem dos painéis homogêneos, utilizou-se partículas retidas na peneira de 20 *mesh*, para os painéis heterogêneos, na camada interna, utilizou-se também a mesma faixa granulométrica dos painéis homogêneos, sendo que, para as camadas externas, os autores usaram o material retido na peneira de 32 *mesh*, com a

proporção de montagem 1:2:1. Os painéis foram produzidos com pressão de 4 MPa, a 140°C, por 12 minutos.

Tabela 13 - Resultado dos painéis de Seringueira realizados no estudo de Gava *et al.* (2015)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
Painéis homogêneos de Seringueira	12%	PUR	0,843	17,09	38,80	5,74	13,21	1.893	2,68
Painéis heterogêneos de Seringueira	12%	PUR	0,880	14,88	37,80	6,08	18,79	2.595	3,26

Fonte: Gava *et al.* (2010).

Ainda sobre o estudo realizado por Gava *et al.* (2010), os autores concluíram que, quando comparados os painéis homogêneos e os painéis heterogêneos, mantendo o mesmo teor de resina, o reajuste granulométrico dos painéis heterogêneos melhoraram as propriedades físicas e mecânicas.

2.4.4 *Tectona grandis* (Teca)

Para Teca, um estudo realizado por Celestino (2020) produziu painéis aglomerados de média densidade 0,750 g/cm³, com cinco diferentes traços de *Corymbia* e *Tectona grandis*, variando as proporções entre os materiais de 100/0%, 75/25%, 50/50%, 25/75% e 0/100%, respectivamente. Os parâmetros para a produção dos painéis empregaram 10% do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona, a 100°C, por 10 minutos, com pressão de 1,9 MPa, conforme informa a Tabela 14 a seguir:

Tabela 14 - Resultado dos painéis de Teca realizados no estudo de Celestino (2020)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Teca	12%	PUR	0,749	2,61	18,22	9,47	12,51	1.996	2,27

Fonte: Celestino (2020).

Outra pesquisa, realizada por Dias (2020), confeccionou painéis de média densidade 0,750 g/cm³ com *Tectona grandis* e *Bactris gasipaes kunth* (Pupunha), nas respectivas proporções de 100/0%, 90/10%, 80/20% e 70/30%, empregando-se 12% de adesivo PUR em relação à massa seca, temperatura de 110°C, por 10 minutos de prensagem com pressão de 1,8 MPa.

Tabela 15 - Resultado dos painéis de Teca realizados no estudo de Dias (2020)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Teca	12%	PUR	0,750	13,78	63,75	6,40	10,62	2.405	1,77

Fonte: Dias (2020).

Por fim, Archangelo (2019) realizou um estudo com Teca e casca de arroz para a produção de painéis homogêneos de alta densidade 0,850 g/cm³, com proporções entre os dois materiais de 100/0%, 90/10%, 80/20%, 70/30% e 0/100%, respectivamente. Os painéis foram produzidos empregando-se 12% de PUR em relação ao peso seco das partículas, com temperatura de 110°C, sendo o tempo de 10 minutos com pressão de 1,95 MPa. Os resultados mais importantes podem ser conferidos na Tabela 16 abaixo:

Tabela 16 - Resultado dos painéis de Teca realizados no estudo de Archangelo (2019)

Painel	Teor de Adesivo (%)	Adesivo	Densidade g/cm ³	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
100% Teca	12%	PUR	0,852	5,89	16,45	5,23	14,26	2.040	2,78

Fonte: Archangelo (2019).

2.5 Adesivo

De acordo com Iwakiri (2005), o adesivo é o componente que participa com o maior custo no processo de produção dos painéis e, devido a isso, é considerável que sejam encontradas alternativas para minimizar o custo final. É importante ressaltar que os parâmetros de dosagem do adesivo em um painel variam com o peso seco das partículas de madeira e com o conteúdo sólido resinoso, sendo de 5% a 10%.

De acordo com Nascimento, Lahr e Christoforo (2015), os adesivos utilizados para a fabricação de painéis se dividem em:

- Adesivos de origem natural, de origem animal, amido, caseína, albumina de proteína vegetal, mamona e tanino (proveniente de espécies vegetais);
- Entre os adesivos sintéticos, destacam-se a ureia, o resorcinol, o fenol, a melanina e o polivinil, que se subdividem em:
 - Adesivos à prova d'água: Isocianato, Fenol formaldeído, Melanina formaldeído e Resorcinol fenol formaldeído;
 - Resistentes à água: Acetato de polivinila modificado e Ureia formaldeído;
 - Não resistentes à água: Acetato de polivinila.

Sobre o consumo de adesivos para a produção de painéis, segundo Iwakiri (2005), partículas menores que compõem as camadas externas do painel consomem mais adesivo devido à sua superfície específica, enquanto partículas maiores, aplicadas na camada interna, consomem quantidade menor.

Os adesivos mais utilizados para colar madeira são formulações à base de ureia-formaldeído, juntamente com fenol-formaldeído, correspondendo a cerca de 90% dos adesivos utilizados para painéis à base de madeira produzidos pelo processo seco (MALONEY, 1993; PIZZI, 1994).

Recomendada para uso interno (sem contato com a umidade), a ureia formaldeído, mais conhecida como UF, é caracterizada por possuir coloração clara, material não inflamável e com boas propriedades de colagem, podendo ser curada tanto a quente quanto a frio através de um catalizador ácido. Também é o material com o mais baixo custo na atualidade, que, quando misturada com melamina, sua resistência à umidade aumenta (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Mesmo que os adesivos à base de formaldeído possuam um custo menor no mercado, surgiu a necessidade de se criar outras alternativas de adesivos que são biodegradáveis, atóxicos, renováveis e não prejudicam o meio ambiente (FIORELLI *et al.*, 2012).

Independentemente de qual a origem do adesivo, é importante ressaltar que sua função principal é unir partes de um conjunto, tendo o objetivo de suportar tensões de uma extremidade à outra, distribuindo de uma forma uniforme as tensões para que o produto final não necessite de fixadores mecânicos (CELESTINO, 2020).

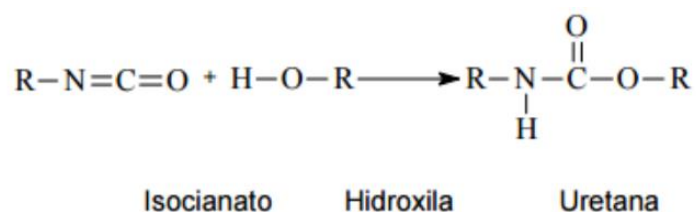
2.5.1 Adesivo bi-componente poliuterana derivado do óleo de mamona

De acordo com Coutinho & Delpech (1999), os poliuretanos são materiais amplamente utilizados em diversas áreas da ciência, abrangendo aplicações desde espumas até elastômeros, fibras, revestimento de superfície e adesivos. É importante que seja pensada a produção de materiais à base de poliuretanos cada vez menos poluentes, pois a presença desses materiais na vida cotidiana está ficando cada vez maior.

O poliuretano, caracterizado como um polímero, é formado pela polimerização por condensação, à qual o grupo de hidroxilas reagem com isocianatos (MOLLEKEN, 2017). No geral, esse material é obtido por reações de poliadição, de forma que apresentam grupos de uretanos, característica

comum para este tipo de polímero (SANCHES, 2016), conforme mostra a Figura 8 abaixo:

Figura 8 - Reação de formação do grupo uretano

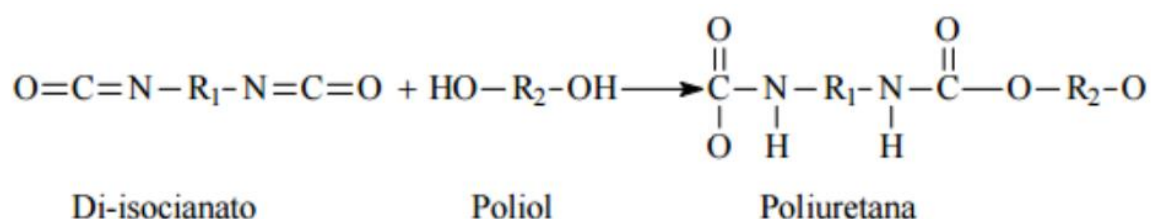


Fonte: Adaptado de Vilar (*apud* Molleken, 2017).

Segundo Jesus (2000), os adesivos poliuretanos podem ser obtidos de duas formas básicas. A primeira, denominada *one-shot*, produz um adesivo poliuretano monocomponente que, na estrutura básica, destaca os três tipos intermediários de sínteses: o polioliol, di-isocianatos e extensores de cadeia, em que é apresentado um bloqueio linear.

A segunda forma, conhecida como *two-steps*, tem como objetivo final resultar em um adesivo poliuretano bicomponente, obtendo-se um pré-polímero no qual a polimerização está incompleta, mas que, ao se misturar a um polioliol, tem como objetivo final a formação de um poliuretano (JESUS, 2000), conforme a Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Reação de polimerização do poliuretano



Fonte: Adaptado de Vilar (*apud* Molleken, 2017)

Ainda segundo Coutinho e Delpech (1999), os poliuretanos podem ser aplicados como revestimento, com a função de proteger e embelezar uma ampla variedade de substratos, pois possuem um excelente desempenho,

sendo utilizados mais comumente em madeira, aço, plásticos, papel, metal, concreto e couro.

O *Ricinus communis L.* é um arbusto perene tropical cultivado comercialmente em mais de 15 países. No Brasil, é popularmente conhecido como mamona, carrapateira ou rícino e possui como uma de suas principais características a produção de um óleo a partir de suas sementes, conhecido internacionalmente como *castor oil*, sendo suas variantes no Brasil óleo de mamona ou óleo de rícino (ANJOS E SILVA *et al.*, 2005).

Segundo Anjos e Silva *et al.* (2005), devido ao seu principal componente, o ácido ricinoléico possui uma estrutura incomum para ácidos graxos existentes em óleos vegetais e algumas propriedades flexíveis. Esse óleo é utilizado em mais de 400 processos industriais, variando desde poltronas e paredes de avião até componentes de automóveis, resinas, cosméticos, equipamentos, tintas e anticongelantes de combustível de espaçonaves e aviões.

O adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona foi desenvolvido no Instituto de Química de São Carlos – SP, da Universidade de São Paulo (Brasil), e vem sendo estudado como uma proposta de utilização de produtos biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa (ARAÚJO, 1992).

Segundo Wechsler *et al.* (2013), para sofrer a polimerização a frio, o óleo de rícino (poliol) pode reagir com um isocianato aromático, diisocianato de difenil metileno (MDI), produzindo assim um adesivo poliuretano termoendurecível. Mesmo que o diisocianato de difenil metileno seja um produto derivado do petróleo, 50% a 75% da resina é proveniente do óleo de mamona, sendo assim o material se classifica como de origem vegetal. Ainda de acordo com Wechsler *et al.* (2013), a resina não é agressiva ao meio ambiente e nem para a saúde humana, podendo ser curada em temperatura ambiente, tendo boa resistência à água e à radiação solar.

Uma das maiores fornecedoras de PUR no Brasil é a IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda. Verifica-se, na ficha catalográfica do poliuretano elaborado pela empresa, a descrição de que o material possui consistência fluida, com uma coloração esverdeada, sofrendo perda de massa com temperaturas acima de 210°C, isenta de liberação de gases tóxicos, tensão de ruptura à tração de 2MPa, módulo de deformação de 10MPa e 20

minutos de reação após a mistura dos dois componentes, sendo recomendável a relação entre os componentes polioli e o pré-polímero de 1:2.

Um estudo realizado por Buzo *et al.* (2019) comparou a utilização do poliuretano derivado do óleo de mamona com a ureia formaldeído para a produção de painéis aglomerados com Pinus e bagaço de cana de açúcar. O estudo concluiu que o adesivo poliuretano propiciou melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, sendo que, para o painel de PUR, o material foi classificado como P6 de acordo com a NBR 14810-2, enquanto que, para o painel com adesivo UF, o material foi classificado como P2.

Outro estudo realizado por Silva *et al.* (2021) comparou três resinas diferentes, sendo duas poliuretanas fornecidas de empresas diferentes e uma ureia formaldeído para a fabricação de painéis com resíduos de Pinus e Eucalipto. Constatou-se que os painéis com poliuretano derivado do óleo de mamona das duas empresas diferentes obtiveram resultados de MOR e de Inchamento 24h superiores quando comparados aos painéis de ureia formaldeído em ambas as espécies.

Variadas literaturas (SOUZA *et al.*, 2021; TREVISAN, 2021; BISPO, 2021; GILIO, 2020; OLIVEIRA, 2019; SUGAHARA, 2018; BUZO, 2018; MINILLO, 2017; ROCHA, 2016) utilizaram o adesivo PUR (poliuretano rícino) com objetivo de se produzir materiais ecológicos e eco eficientes, visando novas alternativas para o mercado consumidor e obtendo resultados melhores do que de painéis que utilizam resinas convencionais.

3 MATERIAL E MÉTODO

Nesta seção, são apresentados os materiais e os métodos utilizados para a produção dos painéis homogêneos e heterogêneos, assim como os equipamentos utilizados e ensaios realizados. Ressalta-se que as espécies de madeiras selecionadas para o desenvolvimento das pesquisas foram todas doadas pela Fazenda de Ensino da UNESP do *campus* de Ilha Solteira.

3.1 Materiais

3.1.1 *Eucalyptus urophylla* (Eucalipto)

O Eucalipto utilizado tanto no primeiro tratamento do estudo quanto no segundo foi coletado com 11 anos de idade, na Fazenda de Ensino da UNESP do *campus* de Ilha Solteira. A Figura 10 ilustra alguns aspectos típicos dessa espécie, como, por exemplo, fendilhamento na direção radial decorrente de tensões internas.

Figura 10 - (a) seção transversal e (b) toras da árvore de Eucalipto cortada



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 *Pinus caribaea* var. *caribaea* (*Pinus*)

A madeira de *Pinus* coletada e utilizada na pesquisa possuía 33 anos de idade. Observa-se, na Figura 11, que, dentre as características dessa espécie, uma delas é a existência de resina.

Figura 11 - (a) seção transversal e (b) toras de *Pinus*



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 *Hevea brasiliensis* (*Seringueira*)

A madeira de Seringueira coletada se constituiu do clone *Rubber Research Institute of Malaysia* (RRIM) 600 com 20 anos de idade. Verifica-se na imagem que é uma madeira de cor clara, sem presença de cerne visível a olho nu, característica que facilita o ataque de insetos; outra característica possível de se observar é o fendilhamento radial, semelhante ao que ocorre com a madeira de Eucalipto.

Figura 12 - (a) seção transversal e (b) toras de madeira de Seringueira



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 *Tectona grandis* (Teca)

A madeira de Teca utilizada possuía 24 anos, é uma espécie arbórea que vem sendo reflorestada nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. Dentre suas principais características, visualmente observa-se claramente o cerne e o alburno, ela também possui boa estabilidade dimensional e é resistente ao ataque de insetos. A Figura 13 ilustra alguns dos principais aspectos visuais da madeira de Teca.

Figura 13 - (a) seção transversal e (b) toras de Teca



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.5 Adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona

O PUR foi obtido por doação da empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, com sede em Aguaí-SP, com o nome comercial de AGT 1315.

Conforme as literaturas citadas (TREVISAN, 2021; GILIO, 2020; BUZO, 2018), utilizou-se a proporção de 1:1 de polioli em relação ao pré-polímero, sendo o polioli um líquido viscoso de coloração clara e oriundo do óleo de rícino e o pré-polímero um diisocianato, material de coloração escura, oriundo do petróleo. A Figura 14 ilustra uma embalagem fornecida pela empresa IMPERVEG.

Figura 14 - Embalagem

contendo o pré-polímero



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Métodos

Os estudos para desenvolvimento dos painéis tiveram como base as orientações contidas nos documentos normativos brasileiros ABNT NBR 14810-1:2013, o qual trata da terminologia dos painéis e de seus componentes, e ABNT NBR 14810-2: 2018, que elenca os ensaios necessários e os procedimentos de avaliação dos painéis. Também as pesquisas bibliográficas apresentadas anteriormente serviram de base metodológica para a pesquisa.

3.2.1 Definição das propostas

Inicialmente, realizou-se um estudo exploratório baseado na ideia de que seria possível utilizar, para a produção dos painéis, material coletado em sua forma integral, diretamente do chão da marcenaria, após a madeira passar pelo processo de desengrosso de suas toras, ou seja, sem nenhum tratamento para seleção, classificação e homogeneização das partículas.

Ressalta-se que os painéis foram fabricados sem classificação dimensional das partículas e sem a mistura das espécies entre si, sendo 4 (quatro) propostas escolhidas para a primeira fase, adotando 10% de adesivo em relação ao peso seco como descrito nas literaturas (SOUZA *et al.*, 2021; GILIO, 2020), com a densidade pré-estabelecida de 0,550 g/cm³.

Em seguida, considerando-se os resultados obtidos dos painéis produzidos com os estudos iniciais descritos anteriormente, propôs-se a continuidade das investigações, considerando ser possível o aproveitamento das partículas provenientes do desengrosso das toras por meio da plaina desengrossadeira para produção dos painéis, desde que as partículas, após serem coletadas no chão da marcenaria, fossem submetidas ao processo de classificação granulométrica e separadas em função de suas dimensões.

Para a produção dos novos painéis, foi definido o aumento do teor de resina para 12%, com base nos estudos desenvolvidos por Dias (2020) e Archangelo (2019), com o objetivo de obter propriedades mecânicas adequadas para os painéis. Consequentemente, considerando-se as quatro propostas iniciais, optou-se pela produção dos novos painéis empregando a metodologia para a produção de painéis heterogêneos. Definiu-se, assim, dois tratamentos distintos, em ambos sendo produzidos 3 (três) painéis para cada proposta, totalizando 24 painéis somadas as duas etapas.

O material para a segunda hipótese foi peneirado, separando as partículas retidas nas peneiras de 4,75 a 1,19 mm, faixa semelhante utilizada na metodologia de Machado *et al.* (2017) para as camadas superficiais, e utilizando o material com granulometria acima de 4,75 mm para a camada interna, de forma a eliminar os finos (partículas abaixo de 1,19 mm).

As proporções para a montagem dos painéis heterogêneos foram de 30/40/30, sendo 30% do peso do material para cada face do painel e 40% do

peso para a parte interna; essa distribuição foi realizada através da montagem do painel nos estudos preliminares. A distribuição de resina foi dividida em três partes, uma para cada camada do painel, totalizando 8% da resina para as camadas finas e 4% para a camada com as partículas maiores, como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Propostas realizadas para a confecção dos painéis

Nomenclatura	Espécie	Teor de adesivo (%)	Densidade inicial (g/cm ³)	Tipo de painel
E_{HO}	Eucalipto	10	0,55	Homogêneo
P_{HO}	Pinus	10	0,55	Homogêneo
S_{HO}	Seringueira	10	0,55	Homogêneo
T_{HO}	Teca	10	0,55	Homogêneo
E_{HE}	Eucalipto	12	0,55	Heterogêneo
P_{HE}	Pinus	12	0,55	Heterogêneo
S_{HE}	Seringueira	12	0,55	Heterogêneo
T_{HE}	Teca	12	0,55	Heterogêneo

Fonte: Elaborado pelo autor.

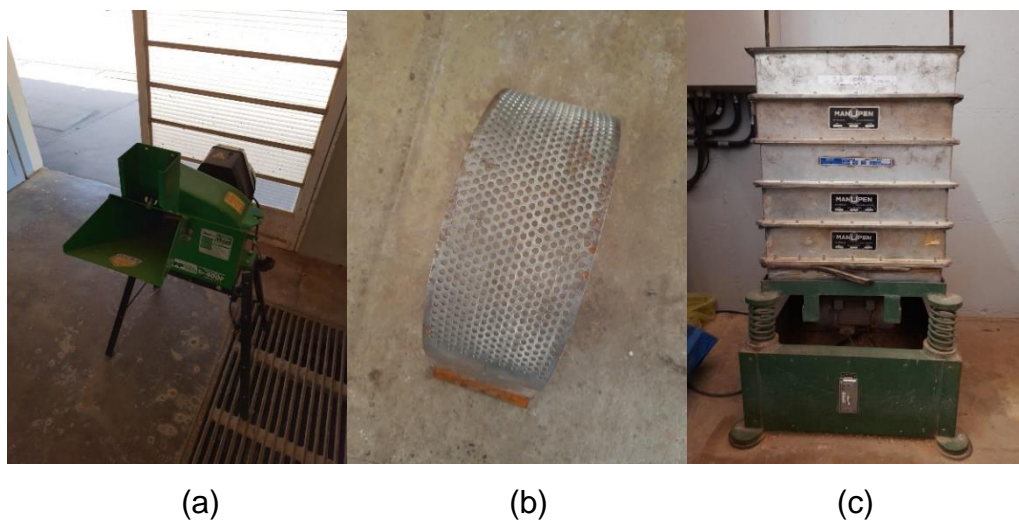
3.2.2 Produção das partículas

As madeiras foram processadas na marcenaria da Empresa Madeireira Paraíso, do município de Ilha Solteira – SP. As toras das quatro espécies encontravam-se com umidades saturadas e, depois de processadas e transformadas em maravalhas, as partículas foram colocadas em estufa à temperatura de 70°C, onde diariamente foi realizado o ensaio de Teor de Umidade até que todo o material chegasse a uma umidade igual ou inferior a 3% (BORYSIUK *et al.*, 2020; KLÍMEK *et al.*, 2016).

Para o segundo tratamento, houve falta das maravalhas da espécie de *Hevea brasiliensis* (Seringueira) e, com isso, novas toras foram processadas. A tora de Seringueira se encontrava na umidade natural, em torno de 12%, gerando, assim, partículas com dimensões diferentes da utilizada no primeiro tratamento. Para as outras três espécies, utilizou-se o mesmo material para se produzir os dois tipos de painéis.

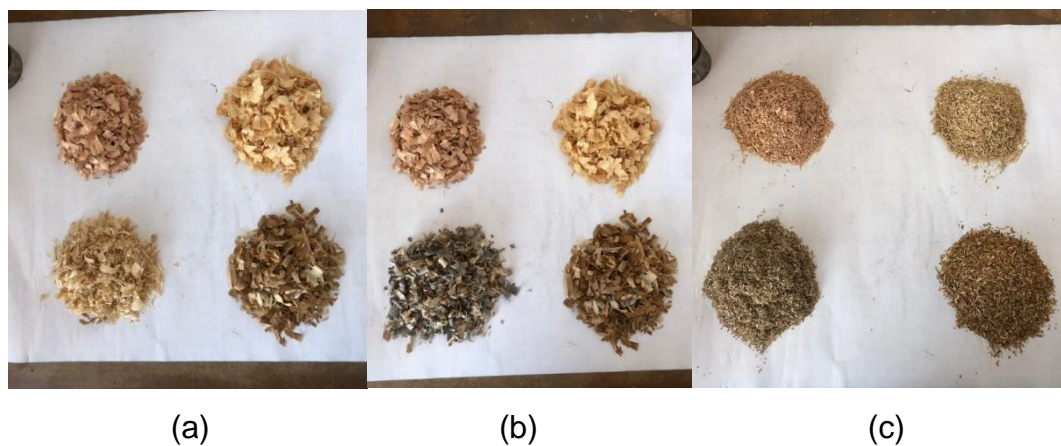
Para a produção do material fino (variando no intervalo de 4,75 a 1,19 mm, conforme Machado *et al.*, 2017), que foi utilizado nas camadas externas dos painéis heterogêneos, foi necessário triturar a maravalha no moinho de facas, conforme ilustrado na Figura 15, utilizando a peneira de 8 mm, em seguida realizando a separação do material fino com o peneirador mecânico e, conseqüentemente, obtendo-se as partículas apresentadas na Figura 16.

Figura 15 - (a) moinho de facas, (b) peneira utilizada e (c) peneirador mecânico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – (a) Partículas dos painéis homogêneos, (b) partículas do núcleo dos painéis heterogêneos e (c) partículas utilizadas nas faces dos painéis heterogêneos, sendo eucalipto, pinus, seringueira e teca, respectivamente



Fonte: Acervo do autor.

3.2.3 Composição granulométrica

Para o ensaio de composição granulométrica das propostas, foi utilizada a norma ABNT NBR NM 248 (2003), entretanto, com algumas adaptações para realização dos ensaios, seguindo os estudos de Trevisan (2021) e Bispo (2021), que utilizaram 35 gramas de massa de partículas para a realização do ensaio.

Inicialmente, para a produção dos painéis homogêneos, foram utilizadas partículas em sua forma integral e, para esses painéis, realizou-se a seleção de partículas empregando-se peneiras com aberturas das malhas em ordem decrescente ($3/4'' = 19,1$ mm; $1/2'' = 12,7$ mm; $3/8'' = 9,52$ mm; $1/4'' = 6,35$ mm; N°4 = 4,75 mm; N°8 = 2,38 mm; N°16 = 1,19 mm e o fundo).

Para a produção dos painéis heterogêneos, o núcleo foi constituído considerando-se a metodologia de seleção de partículas para a produção dos painéis homogêneos e, para composição das faces dos painéis, foram selecionadas partículas utilizando-se as peneiras $1/4'' = 6,35$ mm; N°4 = 4,75 mm; N°8 = 2,28 mm; N°16 = 1,19 mm; N°20 = 0,84 mm e o fundo.

Figura 17 - Aparato para determinação da granulometria da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio de composição granulométrica das partículas foi realizado considerando-se a utilização de uma amostra para cada repetição de painel, sendo três painéis para as 8 propostas, totalizando 24 amostras. De acordo

com Trevisan (2021) e Gilio (2020), o tempo total de peneiramento foi de 15 minutos, com frequência no nível 4 do equipamento.

Após peneiramento mecânico, realizou-se o peneiramento manual até que a perda da massa passante fosse menor que 1%, em seguida, o material retido foi pesado, registrando-se a massa para cálculo da composição granulométrica.

De posse dos resultados obtidos com os ensaios realizados nas 8 propostas, calculou-se a média das massas retidas e acumuladas, bem como o módulo de finura, que se constituiu do valor de referência, para ser possível verificar se o tamanho das partículas estava dentro do esperado para a produção dos painéis.

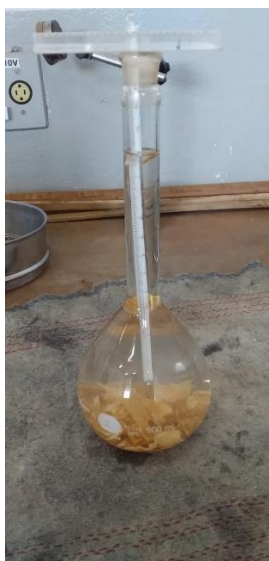
3.2.4 Densidade da partícula e razão de compactação

Para determinação da densidade das partículas, utilizou-se a ABNT NBR 6458 (2017) e a ABNT NBR 6457 (2016), que propõem o método do balão volumétrico. O ensaio se constitui na utilização de um picnômetro N°2, calibrado para 500ml de álcool etílico anidro 99,3°C INPM, termômetro com graduação de 0,1°C, no intervalo de -10°C a 100°C. A Figura 18 ilustra o picnômetro devidamente calibrado com álcool etílico e as partículas de madeira submersas em seu interior.

Figura 18 - (a) material utilizado para realizar o ensaio e (b) exemplo de material ensaiado



(a)



(b)

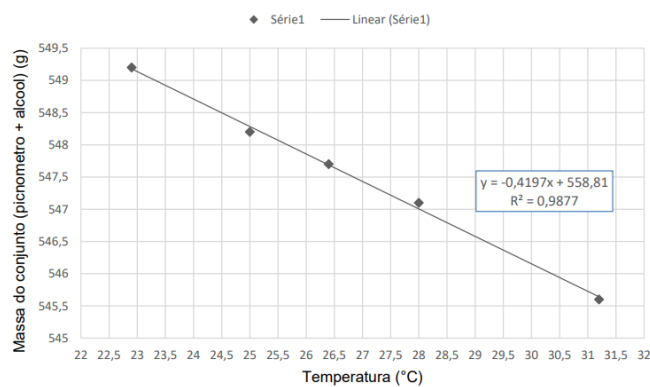
Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à baixa densidade das espécies de madeira, em comparação com agregados para concreto e, com base nos estudos desenvolvidos por Trevisan (2021) e Bispo (2021), foram utilizadas 10g de partículas de madeira com umidade de 3%.

3.2.4.1 Utilização do picnômetro

Com base no trabalho desenvolvido por Trevisan (2021), os valores determinados de M_2 (a massa picnômetro + álcool, à temperatura T de ensaio obtida pela curva de calibração do picnômetro) foram extraídos do Gráfico 1, da curva de calibração do picnômetro, contida no trabalho desenvolvido por Trevisan.

Gráfico 1 - Curva de calibração de picnômetro



Fonte: Adaptado de Trevisan (2021).

No método de calibração do picnômetro, não foi utilizado o aparelho de dispersão, sendo a equação gerada originada de uma tabela com os fatores temperatura, nos intervalos de 0,5 °C, e soma da massa (M_2) do picnômetro com álcool (TREVISAN, 2021).

3.2.4.2 Determinação da massa específica

A massa (M_1) foi definida como sendo o material disperso dentro do picnômetro, com o auxílio de um funil de vidro, somado ao álcool etílico adicionado. Com o valor de M_2 conhecido no gráfico, o valor de M_1 pesado e a temperatura medida após a estabilização, é necessário que se substitua os valores na equação 1:

$$\rho_s = \frac{M_s \times \rho_{al}}{M_2 - M_1 + M_s} \quad (1)$$

Sendo:

ρ_s a massa específica das partículas (g/cm^3);

M_s a massa das partículas secas;

M_1 a massa picnômetro + álcool + partículas madeira, à temperatura T de ensaio, pesada em balança com precisão de 0,01g;

M_2 a massa picnômetro + álcool, à temperatura T de ensaio obtida pela curva de calibração do picnômetro;

ρ_{al} a massa específica do álcool informado pelo fabricante (g/cm^3).

3.2.4.3 Razão de compactação

A partir dos valores de densidades determinadas, a razão de compactação – ou fator de compactação – foi calculada dividindo-se a densidade média do painel pela densidade das partículas, sendo esse valor um importante resultado que relaciona a densidade do painel com a densidade da partícula de madeira em um valor adimensional, no qual uma boa razão de compactação – entre 1,3 e 1,6 (ARAÚJO *et al.*, 2019) – provoca a densificação necessária para consolidar o painel e garantir conformação das partículas:

$$R_c = \frac{D_m}{\rho_s} \quad (2)$$

Sendo:

R_c a razão de compactação adimensional;

D_m a densidade média dos painéis de uma mesma mistura (g/cm³);

ρ_s a massa específica das partículas (g/cm³).

3.2.5 Umidade das partículas

De acordo com Iwakiri (2005) e Nascimento, Lahr e Christoforo (2015), as condições de umidade das partículas possuem papel importante para a produção dos painéis aglomerados. Trabalhos realizados por Trevisan (2021) e Bispo (2021) utilizaram taxa de umidade variando de 2% a 3%. Para alcançar o baixo teor de umidade, colocou-se o material em estufa com temperatura controlada, conforme encontrado nas literaturas (BORYSIUK *et al.*, 2020; KLÍMEK *et al.*, 2016), com 70 °C ±2 °C, até que atingissem umidade inferior a 3% das partículas.

Com base na NBR 9939 (ABNT, 1987), para determinação do teor de umidade, é recomendado o ensaio de três amostras. A massa inicial (massa úmida) do material é coletada e, em seguida, depositam-se as três amostras em estufa à temperatura de 103 °C ±2, afere-se a massa das amostras de 2 em 2 horas até estabilizar o peso seco (massa seca) final. A Figura 16 ilustra a amostras utilizadas para a realização do ensaio de umidade.

Figura 19 - Preparação das amostras para o ensaio de teor de umidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

A equação que foi utilizada para calcular o teor de umidade das amostras segue:

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Na qual:

U representa o teor de umidade da amostra (%);

M_u a massa úmida das partículas (g); e

M_s a massa seca das partículas (g).

É importante ressaltar que, de acordo com a norma, a massa seca só pode ser considerada final quando a diferença entre as duas últimas pesagens não ultrapasse 0,1% de perda de massa da amostra.

3.2.6 Cálculo da massa necessária para a confecção dos painéis

A partir da densidade inicial de 0,550 g/cm³ e dimensões de 350x350x12mm definidas para os painéis, calculou-se a massa necessária para a produção dos painéis utilizando a equação 4:

$$D = \frac{M}{V} \quad (4)$$

Na qual:

D corresponde à densidade inicial do painel (g/cm³);

M corresponde à massa do painel (g); e

V correspondente ao volume do painel, calculado com a espessura média (cm³).

A partir da massa calculada de 810g, definiu-se o teor de resina que, para os painéis homogêneos, foi de 10%, ou seja, 81g, e para os painéis heterogêneos foi de 12%, ou seja, 97,2g, considerando-se a massa seca das partículas.

3.2.7 Produção dos painéis aglomerados

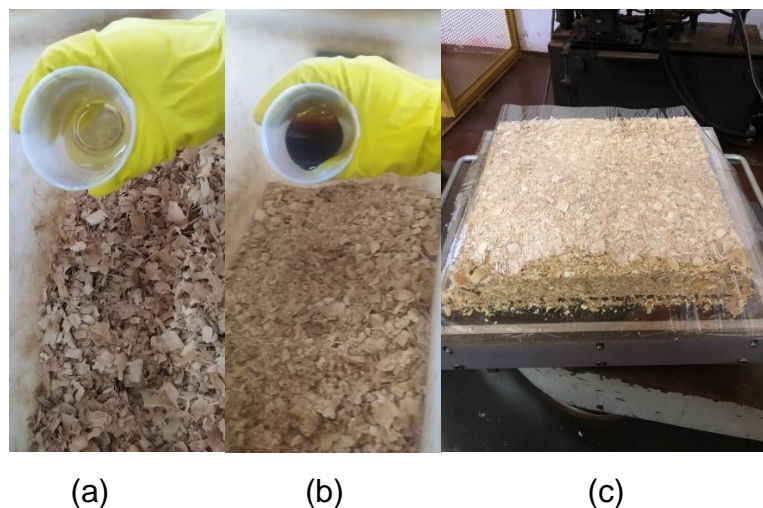
Para os dois tipos de painéis estudados, foram utilizados os mesmos parâmetros de produção, ou seja, pressão de prensagem de 5 MPa, tempo de 10 minutos e 30 segundos para “degasagem” e, para ambos, utilizou-se aglutinante poliuretano derivado de óleo de mamona (PUR), sendo que, de acordo com os estudos desenvolvidos por Souza *et al.* (2021), Trevisan (2021) e Bispo (2021), para os painéis homogêneos, empregou-se 10% de PUR e, para os painéis heterogêneos, baseado nos estudos desenvolvidos por Dias (2020) e Archangelo (2019), empregou-se 12% de PUR.

A homogeneização do adesivo às partículas foi realizada de acordo com a metodologia empregada nos trabalhos de Trevisan (2021), Bispo (2021) e Gilio (2020), ou seja, inicialmente foi adicionado o poliol e homogeneizado manualmente por três minutos e, em seguida, mais cinco minutos em tambor rotatório; a adição e homogeneização do pré-polímero ocorreram da mesma maneira.

Após a homogeneização do PUR, o procedimento seguinte constituiu-se da preparação do colchão de partículas e da prensagem deste na prensa hidráulica, com controle de temperatura e pressão.

A Figura 20 ilustra o momento da adição da PUR e o colchão de partículas pronto para ser prensado.

Figura 20 – (a) Adição de adesivo e (b) colchão de partículas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação aos painéis heterogêneos, constituídos por três camadas, considerou-se, para as camadas das superfícies do painel, 60% da massa total das partículas, com comprimento variando de 4,75 a 1,19mm e, para a camada interna, 40% da massa total das partículas, com comprimento variando de 19,1 a 4,75mm. Foi considerada também uma divisão do adesivo, ou seja, em três partes iguais, sendo 2 partes para as partículas menores, correspondendo a 8%, e 1 parte para as partículas grandes, correspondendo a 4% de adesivo em relação ao peso seco das partículas.

Inicialmente, misturou-se manualmente o poliálcool nas partículas das faces, durante três minutos iniciais, em seguida colocando-os na betoneira por cinco minutos; da mesma maneira, esse procedimento foi adotado para as partículas internas do painel. Dando continuidade ao processo, foi misturado separadamente o pré-polímero nas partículas da face e, em seguida, nas partículas do núcleo.

Após a homogeneização das partículas com o adesivo, foi preparado o colchão de partículas, iniciando com a deposição de uma das faces externas do painel (com partículas variando entre 4,75 a 1,19mm de comprimento) e acomodação das mesmas no interior da formadora de colchão. Em seguida, foram feitas a camada do núcleo do painel (com partículas variando entre 19,1 a 4,75mm de comprimento) e sua acomodação no interior da formadora de colchão e, finalmente, a outra camada externa do painel, considerando-se o

mesmo procedimento adotado nas demais camadas, totalizando 3 camadas, conforme descrito anteriormente com relação aos painéis heterogêneos.

A Figura 21 ilustra o momento da preparação do painel heterogêneo na formadora de colchão.

Figura 21 – (a) acomodação da camada externa do painel e (b) deposição das partículas para formação do núcleo do painel



(a)

(b)

Fonte: Acervo do autor.

Após a formação do colchão de partículas, este foi depositado entre os pratos da presa hidráulica com controle de temperatura e pressão para finalização do processo de produção dos painéis.

A Figura 22 ilustra o momento da deposição do colchão de partículas entre os pratos da prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão.

Figura 22 – (a) Colchão de partículas depositado entre os pratos da prensa, (b) colchão de partículas preparado para a prensagem com filme de PVC e (c) colchão de partículas ilustrando as três camadas de um painel heterogêneo



(a)

(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme descrito anteriormente, os painéis foram prensados com pressão de 5MPa, a 100 °C e com tempo de prensagem de 10 minutos divididos em duas etapas, 5 minutos iniciais com alívio da pressão por 30 segundos e 5 minutos finais, de acordo com os procedimentos adotados por Trevisan (2021), Bispo (2021) e Gilio (2020). A Figura 23 ilustra painéis homogêneos produzidos com as quatro espécies de madeira estudadas neste trabalho.

Figura 23 - Aspectos visuais dos painéis homogêneos produzidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois de prensados, os painéis foram submetidos à estabilização de cura da PUR durante o período de 7 dias. Passado o tempo, realizaram-se os cortes para extração dos cps, sendo 10 corpos de prova para cada ensaio das propriedades que foram avaliadas, ou seja, Flexão Estática (350x50x12 mm), Tração Perpendicular (TP), Densidade (D), Inchamento (I), Absorção (AA) e Umidade (U), todos nas dimensões de 50x50x12 mm.

3.2.8 Realização dos ensaios físicos

Os ensaios físicos de Densidade (D), Inchamento 24h (I) e Teor de Umidade (T.U) foram realizados com base na norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Para melhor compreender os resultados obtidos, foram realizadas, nos cps, verificações de lupa com câmara acoplada, objetivando-se avaliar a interação do adesivo PUR com as partículas de madeira nas superfícies do painel.

3.2.8.1 Densidade

Com base na norma ABNT NBR 14810-2 (2018), a densidade foi calculada através da fórmula expressa a seguir, com um total de 10 corpos de prova (cps):

$$D = \frac{M}{V} \quad (5)$$

Na qual:

D corresponde à densidade do corpo de prova (g/cm^3);

M corresponde à massa do corpo de prova pesado (g); e

V correspondente ao volume do corpo de prova, calculado com a espessura média (cm^3).

Para a aferição da massa do corpo de prova, utilizou-se uma balança com precisão de 0,1g e, para determinação das medidas dos cps, utilizou-se um micrometro para aferir a espessura e um paquímetro para aferir a largura e o comprimento dos cps.

Para determinação do volume, foi utilizada a equação 6.:

$$V = b_1 \times b_2 \times e \quad (6)$$

Na qual:

V é o volume do corpo de prova (cm^3);

b_1 e b_2 são as dimensões de largura e comprimento do corpo de prova (cm), respectivamente; e

e é a espessura do corpo de prova (cm).

3.2.8.2 *Inchamento em espessura e Absorção 24h*

Conforme descrito nas normas ABNT NBR 14810-2 (2018) e ABNT NBR 14810-2 (2013), realizou-se o ensaio de inchamento e o ensaio de absorção 24h.

Inicialmente, selecionou-se 10 cps com dimensões de 50x50x12mm para a realização do ensaio. Vale ressaltar que o ensaio de inchamento está relacionado com a variação da espessura do cp no ensaio de absorção, com a variação da massa, conseqüentemente, o ensaio tem seu início com a aferição da massa inicial (M_0) e da espessura inicial (E_0) e, em seguida, o material é submerso em água por 24h para avaliação da variação de espessura e massa.

A Figura 24 ilustra o processo de aferição da espessura inicial (E_0) e da massa inicial (M_0) dos cps.

Figura 24 – (a) Aferição da E_0 e (b) da M_0 

(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, os corpos de prova foram colocados em um recipiente de plástico com água deionizada conforme descrito no documento normativo e, decorridas 24h, foram aferidas suas massas e espessuras. A Figura 25 ilustra os procedimentos de ensaios realizados.

Figura 25 – (a) Aferição da espessura utilizando um micrômetro digital para avaliação do inchamento e (b) pesagem do cp úmido para avaliação da absorção



(a)

(b)

Fonte: Acervo do autor.

Com os resultados obtidos, calculou-se o inchamento e a absorção de acordo com os documentos normativos, por meio das equações 7 e 8, respectivamente.

$$I_{24h} = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100 \quad (7)$$

Na qual:

I_{24h} corresponde ao inchamento do corpo de prova em um período de 24 horas (%);

E_1 é a espessura final coletada após o tempo de imersão do corpo de prova (cm); e

E_0 é a espessura inicial coletada antes do período de imersão do corpo de prova (cm).

E, para a absorção, foi utilizada a seguinte expressão:

$$AA_{24h} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (8)$$

Na qual:

AA_{24h} corresponde à absorção em água do corpo de prova em um período de 24 horas (%);

M_1 é a massa final coletada após o tempo de imersão do corpo de prova (g); e

M_0 é a massa inicial coletada antes do período de imersão do corpo de prova (g).

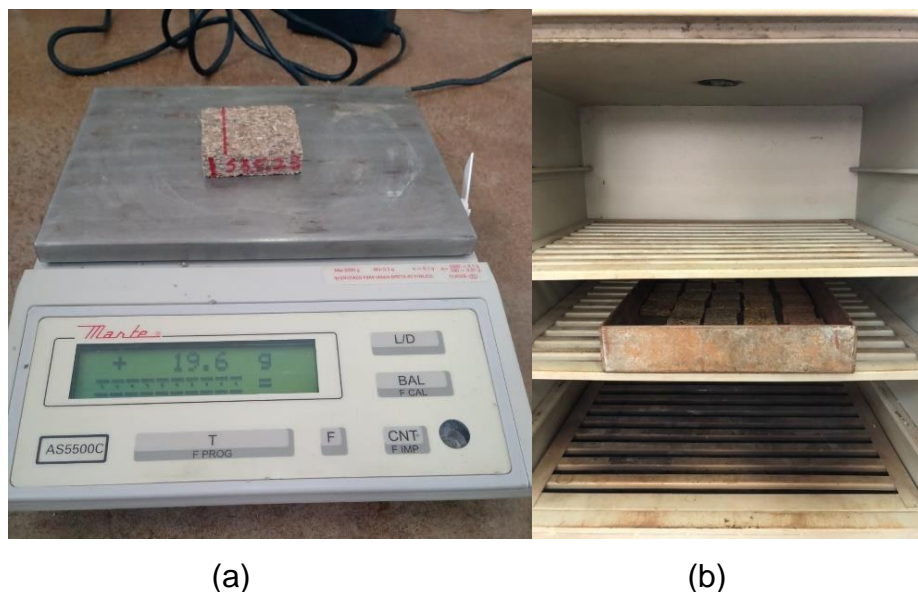
3.2.8.3 Teor de umidade

A umidade dos painéis foi calculada com base na ABNT NBR 14810-2 (2018), conforme citado anteriormente. Para o cálculo, utilizou-se uma balança com precisão 0,01g para aferição das massas (M_u e M_s) de 10 cps nas dimensões de 50x50x12 mm. Após aferição da M_u , os cps foram secos em estufa a $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2$, até a estabilização de suas massas para, finalmente, ser aferida a massa seca M_s , considerando-se a estabilização da massa quando a

diferença entre duas pesagens, no intervalo de 6 horas, não fosse superior a 0,1g.

A Figura 26 ilustra as etapas para determinação do teor de umidade dos painéis.

Figura 26 – (a) Pesagem dos cps para aferição da M_1 e (b) secagem dos cps para posterior aferição da M_0



Fonte: Acervo do autor.

A equação 9 foi utilizada para calcular a umidade dos corpos de prova.

$$T.U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (9)$$

Na qual:

$T.U$ representa o teor de umidade da amostra (%);

M_u é a massa úmida das partículas (g); e

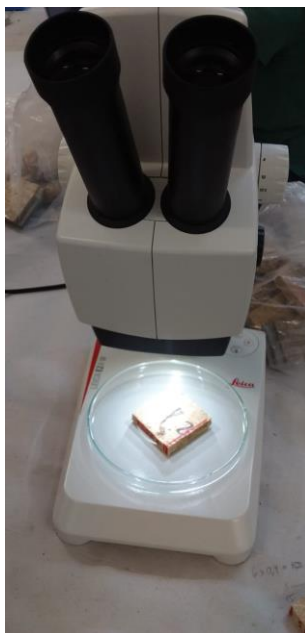
M_s é a massa seca das partículas (g).

3.2.8.4 Análise visual na lupa com câmera acoplada

A análise foi realizada no Laboratório de Estudos de Morfologia e Anatomia Vegetal – LEMAV, da Universidade Estadual Paulista, no Departamento de Biologia e Zootecnia, localizado no Campus II. Foi-se utilizada a lupa de câmera acoplada Leica Ez4W, junto ao programa Las EZ,

nos corpos de prova de densidade e tração, a fim de se analisar as superfícies dos painéis, assim como o perfil transversal do corpo de prova. A Figura 27 ilustra a realização do ensaio.

Figura 27 - Ensaio de microscopia com lupa em cp de 50x50x12mm, que foi utilizada para a determinação da densidade dos painéis



Fonte: Acervo do autor.

3.2.9 Realização dos ensaios mecânicos

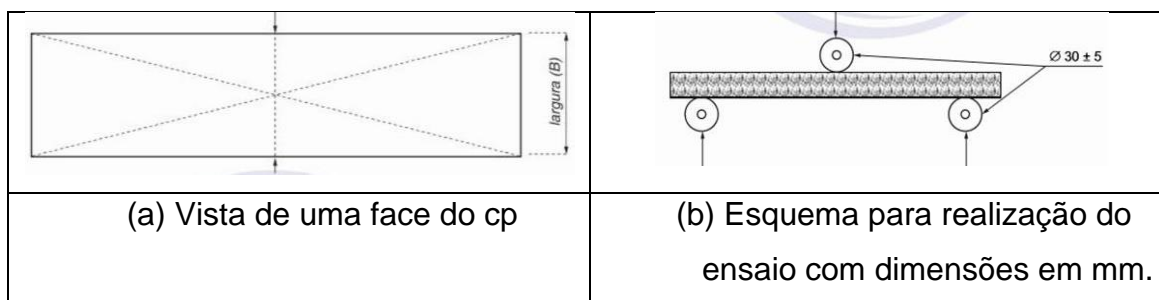
Os ensaios mecânicos foram realizados no laboratório de Engenharia Civil – FEIS/UNESP.

Com base na norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), realizaram-se ensaios para a determinação da resistência à flexão (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE); tração perpendicular (TP); por meio da máquina universal de ensaios EMIC GR048, com capacidade de carga de 300kN.

3.2.9.1 Módulo de Resistência à Flexão Estática e Módulo de Elasticidade

Os ensaios foram realizados com base na NBR 14810-2 (ABNT, 2018), utilizando-se cps conforme ilustrado na Figura 28.

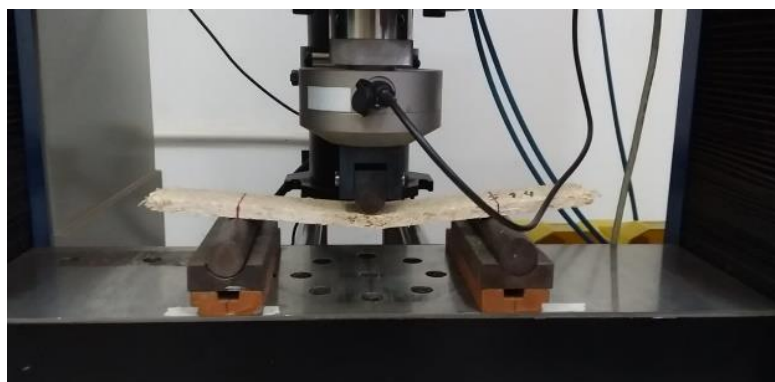
Figura 28 - Desenho esquemático para a realização do ensaio de flexão



Fonte: Adaptado da NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

O ensaio consiste em romper o corpo de prova à flexão, conforme ilustra a Figura 29, aplicando-se um aumento gradual de carga, tracionando as faces inferiores e comprimindo as faces superiores. Vale ressaltar que, nos painéis heterogêneos, as faces foram compactadas com partículas com dimensões variando entre 1,19 a 4,75 mm e o núcleo do painel com partículas variando entre 4,75 a 19,1 mm; para os painéis homogêneos, as partículas foram distribuídas aleatoriamente, com dimensões variando entre 1,19 a 19,1 mm.

Figura 29 – Ensaio de flexão estática



Fonte: Acervo do autor.

De acordo com o documento normativo, o vão entre os apoios deve possuir comprimento 20 vezes o valor de espessura média do cp, conseqüentemente, foi calculada a espessura média de cada painel adotando-se um vão médio para cada corpo de prova.

Com base na força de ruptura, foi calculado o MOR por intermédio da equação 10.

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2} \quad (10)$$

Na qual:

MOR é o módulo de resistência à flexão estática (MPa);

P é a carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

D é a distância entre os apoios (mm);

B é a largura do corpo de prova (mm); e

E é a espessura média adotada no corpo de prova (mm).

Considerando os valores obtidos para determinação do MOR, determinou-se o MOE com o emprego da equação 11.

$$MOE = \frac{P1 \times D^3}{d \times 4 \times P \times E^3} \quad (11)$$

Na qual:

MOE é o módulo de elasticidade (MPa);

P1 é a carga de limite de proporcionalidade lida no indicador de cargas (N);

D é a distância entre os apoios (mm);

d é a deflexão, correspondente à carga *P1* (mm);

B é a largura do corpo de prova (mm); e

E é a espessura média adotada no corpo de prova (mm).

3.2.9.2 Tração Perpendicular

Conforme descrito anteriormente, foram ensaiados 10 cps, nas dimensões de 50x50x12 mm, para determinação da TP.

A respeito da realização do ensaio de determinação da T.P, é importante ressaltar a preparação dos corpos de provas, que se constituiu da limpeza das superfícies dos cps e dos suportes metálicos que foram colados para propiciar a realização do ensaio; a limpeza dos corpos de provas foi realizada com uma lixadeira de fita.

Após a limpeza dos corpos de provas, realizou-se a colagem dos suportes metálicos conforme ilustrado na Figura 30. Os cps foram colados com uma resina epóxi bicomponente.

Figura 30 – (a) Ilustração da resina epóxi utilizada e (b) do esquema de fixação dos suportes metálicos nos cps



(a)



(b)

Fonte: Acervo do autor.

A cola utilizada foi a Araldite epóxi 234g bicomponente, com secagem inicial de 90 minutos e tempo de cura total em 24 horas. Inicialmente, a colagem consistiu em misturar os dois componentes da cola e passar nas duas faces dos corpos de provas, em seguida, os cps foram fixados nos suportes metálicos, conforme ilustra a Figura 31. Os cps permaneceram sob a ação de presilhas durante o período de 24 horas para cura da resina.

Decorridas as 24 horas, os corpos de provas foram ensaiados conforme ilustra a Figura 31.

Figura 31 – (a) Ensaio de T.P e (b) aspectos gerais do cp com suporte metálico colado após ruptura



(a)

(b)

Fonte: Acervo do autor.

Para o cálculo da tração perpendicular, utilizou-se a Equação 12.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (12)$$

$$S = b1 \times b2 \quad (13)$$

Na qual:

TP é a resistência à tração perpendicular (MPa);

P é a carga na ruptura (N);

S é a área da superfície do cp (mm²); e

$b1$ e $b2$ são as dimensões do cp (mm).

3.2.10 Análise Estatística

A análise estatística foi realizada pelo software Minitab®. O teste de contraste de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para avaliar a influência do tipo de painel (de partículas homogêneas ou heterogêneas) em cada uma das propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Do teste de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade, B o segundo maior valor médio da propriedade e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias consideradas estatisticamente equivalentes entre si.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos itens seguintes, serão discutidos os resultados dos ensaios físicos e mecânicos de cada espécie de forma separada, correlacionando com as literaturas supracitadas e, em seguida, será apresentada uma tabela de resumo dos principais resultados em comparação ao documento normativo.

Nas tabelas abaixo, são apresentados os valores médios (X_m), os coeficientes de variação (CV) e os resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) das propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas homogêneos e heterogêneos fabricados com base nas quatro espécies de madeira.

4.1 *Eucalyptus urophylla* (Eucalipto)

4.1.1 *Avaliação das propriedades das partículas*

4.1.1.1 *Composição granulométrica*

O objetivo da determinação da composição granulométrica se baseou em encontrar a distribuição granulométrica das partículas que não passaram por nenhum processo de homogeneização mecânica.

Sabe-se, com base na literatura, que as partículas possuem uma correlação com as propriedades finais dos painéis, influenciando também na forma de produção do mesmo. Na Tabela 18 pode-se analisar o percentual passante e retido, assim como o módulo de finura do material para a produção de painéis homogêneos, enquanto nas Tabelas 19 e 20 observam-se os valores referentes ao material trabalhado para a confecção de painéis heterogêneos.

Tabela 18 - Composição granulométrica do Eucalipto para painéis homogêneos

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
N°	D (mm)						
3/4"	19,10	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
1/2"	12,50	5,90	5,90	16,86%	16,86%	29,10	83,14
3/8"	9,52	5,50	11,40	15,71%	32,57%	23,60	67,43
1/4"	6,30	5,00	16,40	14,29%	46,86%	18,60	53,14
N° 4	4,75	4,80	21,20	13,71%	60,57%	13,80	39,43
N° 8	2,36	8,00	29,20	22,86%	83,43%	5,80	16,57
N° 16	1,19	3,50	32,70	10,00%	93,43%	2,30	6,57
Fundo	Fundo	2,20	34,90	6,29%	99,71%	0,10	0,29
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,10		0,29		3,34	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se ainda, na Tabela 18, que a maior distribuição das partículas se localizou nas malhas com aberturas variando de 12,5mm a 2,36mm, totalizando um acúmulo de 83,43% do peso do material. Essa grande variação granulométrica, quando aplicada a painéis homogêneos, se torna algo prejudicial na confecção do material devido ao fato de as partículas menores descenderem por gravidade nos espaços causados pelo agrupamento das partículas maiores. Conforme o ocorrido, o material não conseguiu obter uma homogeneização eficiente para possuir as duas faces com a mesma granulometria, o que será visto adiante na análise com lupa com câmera acoplada.

Esteticamente, a produção do painel deve resultar em faces iguais nas duas superfícies do material, sendo que, no painel homogêneo fabricado, resultaram ambos os lados com faces diferentes, a superior com partículas maiores e a inferior, com menores, conforme também será visto adiante.

As Tabelas 19 e 20 mostram a distribuição granulométrica dos materiais da face e do núcleo dos painéis heterogêneos.

Tabela 19 - Distribuição granulométrica do Eucalipto para as faces do painel heterogêneo

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
N°	D (mm)						
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
N° 4	4,75	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
N° 8	2,36	0,80	0,80	2,29%	2,29%	34,20	97,71
N° 16	1,19	20,80	21,60	59,43%	61,71%	13,40	38,29
N° 20	0,084	9,30	30,90	26,57%	88,29%	4,10	11,71
Fundo	Fundo	3,90	34,80	11,14%	99,43%	0,20	0,57
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,20		0,57		1,52	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como visto na Tabela 19, utilizou-se um material com partículas menores para a extremidade do painel, com o intuito da face superior e inferior não possuírem partículas diferentes, como ocorreu na produção dos painéis homogêneos. A maior quantidade das partículas se localizou no intervalo de 1,18 a 0,084mm, com valores retidos de 59,43% e 26,57% respectivamente; além de ser de maior ajuda nas propriedades de tração dos painéis, o material menor também serviu como um nivelador de chapa, para que a carga fosse aplicada uniformemente ao longo de todo o painel.

Com o intuito ainda de utilizar o material como resíduo, sem passar por nenhum tratamento prévio de trituração ou de redução das dimensões das partículas, o resíduo de serraria foi colocado no núcleo do painel, sendo sua composição apresentada na Tabela 20 abaixo:

Tabela 20 - Distribuição granulométrica do Eucalipto para o núcleo do painel heterogêneo

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
N°	D (mm)						
3/4"	19,10	1,20	1,20	3,43%	3,43%	33,80	96,57
1/2"	12,50	6,40	7,60	18,29%	21,71%	27,40	78,29
3/8"	9,52	6,50	14,10	18,57%	40,29%	20,90	59,71
1/4"	6,30	8,30	22,40	23,71%	64,00%	12,60	36,00
N° 4	4,75	6,10	28,50	17,43%	81,43%	6,50	18,57
N° 8	2,36	5,40	33,90	15,43%	96,86%	1,10	3,14
N° 16	1,19	0,70	34,60	2,00%	98,86%	0,40	1,14
Fundo	Fundo	0,00	34,60	0,00%	95,43%	0,40	1,14
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,40		1,14		4,07	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o posterior peneiramento para a eliminação das partículas finas, a maravalha foi utilizada de forma integral no núcleo do painel heterogêneo, correspondendo a cerca de 40% em peso do material total. Pela Tabela 20 anterior, a faixa de variação ficou entre as peneiras de 12,5 a 2,36mm, sendo o somatório de material retido entre essas faixas granulométricas cerca de 96,86% do material total. Essa reconfiguração das partículas na montagem do painel garantiu um melhoramento significativo das propriedades mecânicas, como será visto posteriormente nos próximos subitens.

4.1.1.2 Massa específica

A massa específica da partícula, conhecida também como densidade da partícula, visa conhecer as propriedades que irão influenciar na razão de compactação do material, como também as propriedades dos painéis, pois madeiras com densidades menores produzirão painéis com características melhores (IWAKIRI, 2005). Para ambas as hipóteses, por utilizarem o mesmo material, realizou-se apenas um ensaio para a verificação da massa específica, mostrado nas Tabelas 21 e 22 abaixo.

Tabela 21 - Resultado da massa específica do Eucalipto (*Eucalyptus urophylla*)

Espécie	M₁ (g)	T (°C)	M₂ (g)	M_s (g)	ρ_{al} (g/cm³)	ρ_s (g/cm³)
Eucalipto	545,7	29,00	546,63	5,00	0,789	0,665

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 22 - Comparativo do resultado da massa específica do Eucalipto com os encontrados nas literaturas

Literatura encontrada	Massa específica (g/cm³)
Autor	0,665
Mendes et al., (2014)	entre 0,520 a 0,650
Ribeiro & Filho (1993)	> 0,510
Ferreira, Freitas e Ferreira (1979)	entre 0,516 a 0,534

Fonte: acervo do autor.

Como pode ser visto na Tabela 22, o valor encontrado através do ensaio da Tabela 21 encontra-se superior aos limites encontrados pela literatura, que

varia de 0,510 g/cm³ ao máximo de 0,650 g/cm³. Mesmo assim, essa espécie de 11 anos pode ser classificada com de média densidade, sendo um material bom para ser utilizado para painéis aglomerados, podendo ser melhor combinado com espécies de densidade menores. Através do valor obtido de 0,665 g/cm³, calculou-se a razão de compactação nominal e também a razão de compactação efetiva.

4.1.2 Avaliação das propriedades dos painéis

4.1.2.1 Densidade e Razão de Compactação

Para a realização do ensaio de densidade, foram utilizados os mesmos corpos de provas do ensaio de tração. Os fatores que influenciam a densidade – como tempo de prensagem, pressão, temperatura e adesivo – também influenciam os resultados referentes à tração perpendicular (TP). Para o cálculo da razão de compactação nominal, utilizou-se a densidade nominal adotada para o cálculo inicial da massa do painel. Na razão de compactação efetiva, foi usada a densidade efetiva calculada pelo valor médio dos corpos de prova, sendo esse o parâmetro mais importante para a comparação com a literatura.

Tabela 23 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Eucalipto

Proposta	Densidade nominal (g/cm ³)	Densidade efetiva (g/cm ³)	Razão de compactação nominal	Razão de compactação efetiva
E _{HO}	0,605	0,744 ^B (2,88) *	0,93	1,12
E _{HE}	0,616	0,824 ^A (3,09) *	0,95	1,24

Fonte: Elaborado pelo autor.

()* Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Conforme visto na Tabela 23, a reestruturação do painel gerou um aumento na densidade efetiva do mesmo, aumentando a razão de compactação de 1,12 para 1,24. Literaturas, como Araújo *et al.* (2019), citam que, para que um fator de compactação seja classificado como bom, precisa

estar variando de 1,3 a 1,6. O baixo fator de compactação dos painéis homogêneos reflete a alta dispersão granulométrica observada na Tabela 18, o que impossibilita, assim, um real ajuste das partículas nas dimensões propostas para prensagem.

Com relação à densidade apresentada, a NBR 14810-1 (ABNT, 2013) classifica painéis de média densidade sendo aqueles que possuem um resultado no intervalo de 0,551 a 0,750 g/cm³, no qual o painel E_{HO} se classifica como painel de média densidade 0,744g/cm³ e o painel E_{HE} como um painel de alta densidade 0,824g/cm³.

Tabela 24 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Eucalipto com os encontrados nas literaturas

Nomenclatura	Teor de adesivo	Tipo de adesivo	Densidade efetiva
E_{HO} (Autor)	10%	PUR	0,744^B (2,88) *
E_{HE} (Autor)	12%	PUR	0,824^A (3,09) *
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	0,720
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	0,730
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	UF	0,700
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	6%	FF	0,618
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	8%	FF	0,629
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	12%	FF	0,624
100T (100% torretes de eucalipto) (PIERRE, BALLARIN E PALMA 2014)	7,5% em relação à base peso seco das partículas na camada interna e 9,5% na camada externa	UF	0,650
100% Eucalipto (BIANCHE <i>et al.</i> , 2012)	6 e 8%	UF	0,630

Fonte: Elaborado pelo autor.

()* Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Como é possível visualizar na Tabela 24, a densidade dos painéis confeccionados comparados com as literaturas citadas é maior que a esperado. A densidade nominal de ensaio adotado para cálculo da massa e produção dos painéis nas pesquisas de Silva *et al.* (2021); Faria *et al.* 2020; Pierre, Ballarin e Palma (2014) e Bianche *et al.* (2012) foram respectivamente 0,714 g/cm³; 0,700 g/cm³; 0,650 g/cm³ e também 0,650 g/cm³.

Um dos fatores que pode explicar o alto valor da densidade dos painéis produzidos é o da pressão utilizada para selar os painéis. No presente estudo, foi-se utilizado 5 MPa, sendo que, nos estudos correlacionados, variou-se entre 3,2 a 3,92 MPa. A utilização de uma pressão de compactação alta reflete na alta densidade do painel, pois será utilizada uma pressão muito maior para se compactar o mesmo volume estimado e, conseqüentemente, a razão de compactação dos painéis aumenta, podendo aumentar também os resultados dos ensaios mecânicos (BRITO *et al.*, 2020).

Outro fator que pode explicar o aumento da densidade em relação às duas propostas E_{HO} e E_{HE} são os ajustes granulométricos relacionados com a formação do painel e a melhor aderência da partícula em seu travamento granular. Como pode-se observar no estudo de Silva *et al.* (2021), a variação de adesivo também influencia na densidade, sendo a diferença entre UF e PUR de 0,030 g/cm³. No estudo de Faria *et al.* (2020), também é possível deduzir que o aumento do mesmo adesivo para confecção dos painéis aumenta a densidade final da mistura, de forma que a diferença entre 6% e 12% de FF ficou em torno de 0,006 g/cm³, proporcional ao aumento calculado para o adesivo.

Mesmo possuindo diferenças em relação às densidades propostas, esses valores são menores quando comparados à diferença das densidades encontrada no presente estudo, de 0,080 g/cm³. Com isso, pode-se inferir que o aumento da densidade em relação aos dois tratamentos propostos não se baseia apenas no aumento do teor de adesivo, como também no reajuste das partículas antes da prensagem do material, sendo essa afirmação validada através dos resultados estatísticos.

4.1.2.2 Propriedades físicas

Os resultados dos ensaios físicos, referentes à espécie de *Eucalyptus urophylla*, encontram-se descritos na Tabela 25 abaixo:

Tabela 25 - Resultado dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Eucalipto comparados com as literaturas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)
E_{HO} (Autor)	10%	PUR	19,69^A (21,78) *	46,64^A (11,53) *	4,49^B (8,67) *
E_{HE} (Autor)	12%	PUR	14,39^B (15,25) *	38,01^B (7,96) *	6,97^A (5,62) *
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	5,92	-	-
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	7,85	-	-
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	UF	16,12	-	-
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	6%	FF	22,75	109,58	8,93
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	8%	FF	13,09	97,47	9,60
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	12%	FF	8,08	81,79	9,50
100T (100% torretes de eucalipto) (PIERRE, BALLARIN e PALMA, 2014)	7,5% em relação à base peso seco das partículas na camada interna e 9,5% na camada externa	UF	-	-	9 - 12,5%
100% Eucalipto (BIANCHE <i>et al.</i> , 2012)	6 e 8%	UF	33,54	57,62	9,53

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Analisando os resultados mostrados na Tabela 25, em relação aos dois tratamentos trabalhados para a confecção dos painéis, nas propriedades de Inchamento 24 horas (doravante I24h) sendo 19,69% para os painéis

homogêneos e 14,39% para painéis heterogêneos, ocorreu uma redução significativa de 27% do inchamento.

Esta redução se baseia no fato de o adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona rícino ser um material que garante a impermeabilização e também o envelopamento das partículas (SOUZA *et al.*, 2021; GILIO, 2020) nos painéis aglomerados. Com o aumento do teor de adesivo de 10% para 12%, era esperado um melhoramento das propriedades físicas, além de que o aumento da razão de compactação de forma positiva contribuísse para melhorar as características do painel.

O mesmo vale para a Absorção em água 24 horas, que, para os painéis homogêneos de Eucalipto, ficaram com um valor em torno de 46,64%, enquanto nos painéis heterogêneos seus valores se mostraram em torno de 38,01%, ocorrendo, assim, uma redução significativa na absorção de 18,40%, melhorando a permeabilidade do painel em relação à água.

Para o teor de umidade em comparação com os dois tratamentos, houve um aumento de 55,23% do painel heterogêneo, 6,97% em relação ao painel homogêneo, que obteve 4,49%. A justificativa para esse aumento pode ser baseada na temperatura ambiente na qual os painéis foram produzidos, em que não houve um controle exato do clima, e o aumento do teor de resina, sendo que o aumento não prejudicou a avaliação do painel em relação aos parâmetros normativos.

Em comparação com a literatura citada, o menor I_{24h} de 5,92-7,85% está relacionado com o maior teor de resina utilizado por Silva *et al.* (2021), em uma proporção de 15% de adesivo em relação ao peso seco dos dois tipos de PUR utilizados. É importante destacar que, em comparação com o adesivo de UF utilizado pelos mesmos autores, o I_{24h} ficou em torno de 16,42%, um valor próximo com o encontrado no presente estudo, usando uma quantidade menor de adesivo, de forma que o I_{24h} foi de 14,39% para apenas 12% de adesivo em relação ao peso seco para produzir os painéis heterogêneos.

A pesquisa realizada por Faria *et al.* (2020) explicitou que, com a variação do teor de adesivo FF, ocorreu uma redução significativa nas propriedades de inchamento, sendo que, para a proporção de 8% e 12%, os valores de I_{24h} foram 13,09% e 8,08%. Mesmo o fenol formaldeído sendo um adesivo resistente à água (NASCIMENTO; LAHR; CHRISTOFORO, 2015), ele não

conferiu ao painel uma absorção eficiente, sendo os valores para 8% e 12% de resina, respectivamente, 97,47% e 81,79%, resultados estes muito acima dos encontrados no presente estudo, sendo para 10% de adesivo PUR a AA24h com valores margeando 46,64% e, para 12% de resina, AA24h em torno de 38,06%.

O presente estudo ainda mostrou valores de I24h, AA24h e T.U superiores quando comparados com as demais literaturas estudadas (PIERRE, BALLARIN e PALMA, 2014; BIACHE *et al.*, 2012), podendo ser vistas na Tabela 25, que, apesar de usarem diferentes teores de resinas em relação ao estudo, produziram seus painéis com adesivo ureia formaldeído, que possui baixa resistência à água (GILIO, 2020).

4.1.2.3 Propriedades mecânicas

Os resultados do módulo de resistência à flexão estática, módulo de elasticidade e tração perpendicular para a espécie *Eucalyptus urophylla* se encontram na Tabela 26 abaixo.

Tabela 26 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Eucalipto em comparação com as literaturas propostas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
E_{HO} (Autor)	10%	PUR	6,92^B (12,35) *	1.434^B (12,66) *	0,36^B (18,03) *
E_{HE} (Autor)	12%	PUR	17,92^A (16,76) *	2.323^A (16,19) *	0,81^A (32,65) *
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	20,00	1.796	1,61
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	18,50	1.880	1,71
100% Maravalha de Eucalipto (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	UF	13,17	1.639	1,25
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	6%	FF	3,27	385,83	0,13
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	8%	FF	4,88	637,53	0,21
100% Maravalha de Eucalipto (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	12%	FF	7,27	932,86	0,38
100% Eucalipto (BIANCHE <i>et al.</i> , 2012)	6 e 8%	UF	10,88	1.383,81	0,37

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Em relação aos dois tratamentos trabalhos no presente estudo, o aumento do teor de resina, atrelado com a reconfiguração do uso do resíduo de Eucalipto em camadas, propiciou melhoramento das propriedades mecânicas significativo para esta espécie, mostrado estatisticamente na Tabela 26. Esse aumento foi de 1,5 vezes o valor do MOR, obtendo um resultado semelhante para o MOE dos painéis homogêneos, 6,92 MPa e 1.434 MPa, em relação aos painéis heterogêneos, 17,92 MPa e 2.323 MPa.

Em relação à ligação interna (tração perpendicular), os resultados dos painéis do segundo tratamento foram mais que o dobro do valor referente aos painéis do primeiro tratamento, sendo 0,81 MPa e 0,36 MPa, respectivamente. A justificativa para o melhoramento das propriedades se deve ao aumento significativo da razão de compactação, especificado em literaturas já abordadas anteriormente (BRITO *et al.*, 2020; ARAÚJO *et al.*, 2019; IWAKIRI, 2005).

Em relação aos painéis homogêneos realizados no primeiro tratamento, os únicos valores aos que o presente estudo obteve resultados superiores foram da pesquisa de Faria *et al.* (2021) para misturas utilizando 6 e 8% de adesivo fenol formaldeído, possuindo também um MOE superior à mistura realizada com 12%, conforme visto na Tabela 26.

O que pode explicar a baixa resistência mecânica em ambas as pesquisas foi o fato de se ter trabalhado com partículas muito maiores do que aquelas realizadas em estudos convencionais (SOUZA *et al.*, 2021; TREVISAN, 2021; GILIO, 2020), das quais a pesquisa de Faria *et al.* (2019) aponta falhas e espaços vazios nos painéis produzidos devido às partículas serem grandes, prejudicando as propriedades físicas e mecânicas. A baixa resistência mecânica do material do primeiro tratamento impossibilita-o de ser classificado de acordo com o parâmetro normativo, o qual será discutido posteriormente.

Comparando com a literatura proposta (SILVA *et al.*, 2021; FARIA *et al.*, 2019; BIANCHE *et al.*, 2019), os únicos valores que o presente estudo não teve um resultado superior aos painéis heterogêneos foram referentes ao MOR e T.P de Silva *et al.* (2021), que, para MOR, obteve valores acima para ambas as resinas de PUR utilizadas, sendo de 20,00 e 18,50 MPa e, para T.P, as três

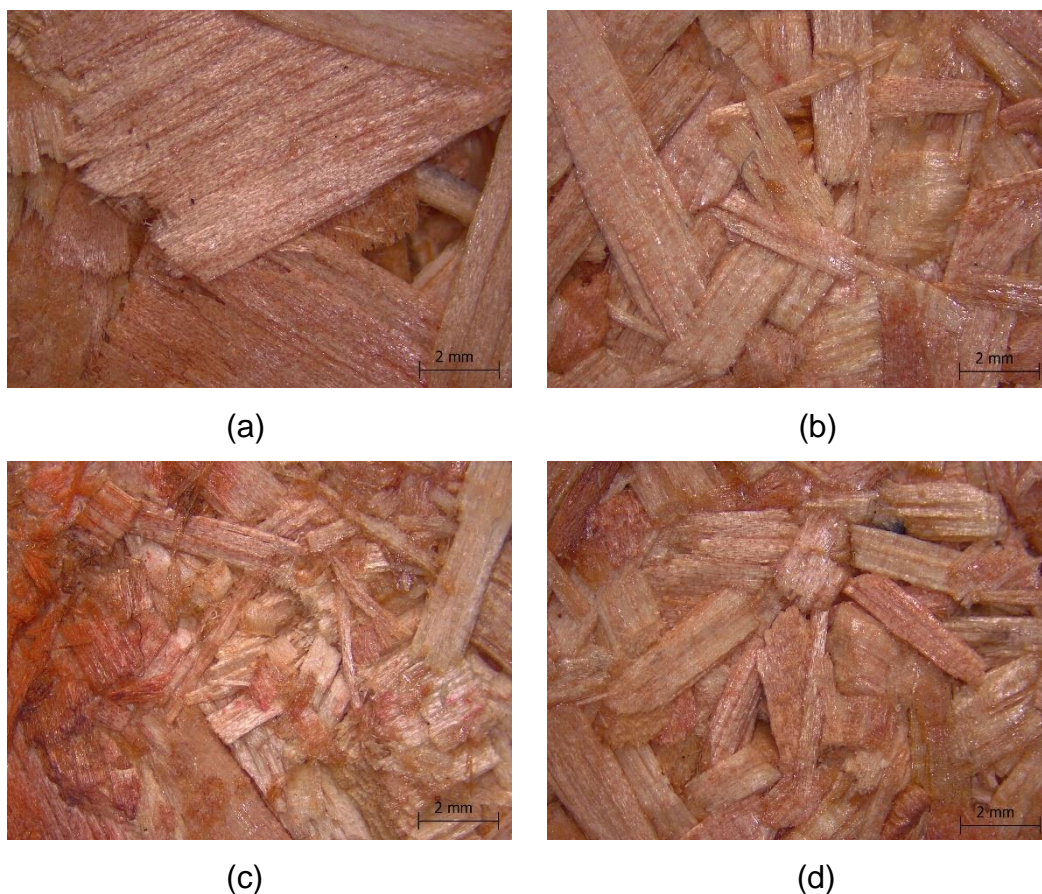
resinas utilizadas obtiveram valores superiores aos deste estudo, sendo 1,61, 1,71 e 1,25 MPa, respectivamente.

Uma das hipóteses que justifica os resultados se baseia na quantidade de adesivo, sendo que, no estudo acima, utilizou-se cerca de 3% a mais do que usado no segundo tratamento para confeccionar os painéis heterogêneos, e também a granulometria da maravalha utilizada para confeccionar os painéis pode ser outra hipótese que explicaria o aumento principalmente da resistência à tração, o que não pode ser analisado uma vez que o artigo não informa qual foi a faixa granulométrica usada.

4.1.3 *Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada*

É possível observar, através da utilização da lupa para análise visual dos corpos de prova de densidade e tração, os resultados obtidos no processo da manufatura dos painéis em uma escala aumentada em 8 vezes, podendo ser melhor estudadas por meio das Figuras 32 e 33 a seguir:

Figura 32 – Detalhes dos corpos de prova de Eucalipto, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos



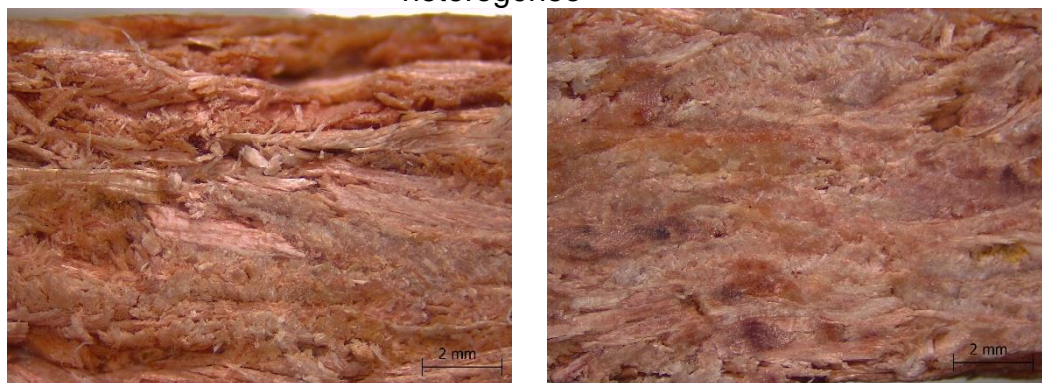
Fonte: Acervo do autor.

Conforme se observa na Figura 32, quando comparado o detalhe (a) com o detalhe (b), é possível observar que as partículas usadas para confeccionar ambos os painéis foram dispostos de forma diferente. No detalhe (a), é possível ver, pela escala de 2mm informada, que há espaços vazios entre as partículas e que elas são muito maiores do que as mostradas no detalhe (b), o qual mostra as partículas menores e mais bem ajustadas dos painéis heterogêneos.

O mesmo ocorre quando são comparados os detalhes (c) e (d) da Figura 32. No caso do detalhe (c), é possível visualizar o fenômeno explicado no subitem referente à composição granulométrica, relacionado com a “queda” das partículas menores por gravidade no painel homogêneo, o que deixa a face superior com uma maior quantidade de partículas grandes e, na face inferior,

uma menor quantidade, além de não possuir um agrupamento ordenado como se observa no detalhe (d), referente à manufatura do painel heterogêneo.

Figura 33 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Eucalipto, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo



(a)

(b)

Fonte: Acervo do autor.

O mesmo pode ser visualizado na Figura 33. A falta de organização das partículas para a produção dos painéis homogêneos resultou em uma compactação deficiente, como se pode ver no detalhe (a), que mostra a seção transversal do corpo de prova possuindo partes compactadas e partes não compactas, algo totalmente diferente quando se observa o detalhe (b), resultante da confecção dos painéis heterogêneos, no qual, além de mostrar a boa compactação que o material recebeu, não é possível distinguir as três camadas do material produzido, de forma que é possível classificar esse painel como painel heterogêneo de camadas graduadas.

Com isso, segundo os estudos de Gava *et al.* (2015) e Bueno (2015) – que compararam as duas metodologias para se produzir painéis utilizando o adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona PUR – e com a análise estatística realizada, pode-se previamente concluir que a reestruturação das partículas na mudança entre os tratamentos propostos para a espécie de Eucalipto ocorreu de forma benéfica, de maneira que as propriedades mecânicas e físicas foram melhoradas.

4.2 *Pinus caribaea* var. *caribaea* (Pinus)

4.2.1 Avaliação das propriedades das partículas

4.2.1.1 Composição granulométrica

Assim como foi realizado com o Eucalipto, os resultados referentes à composição granulométrica da espécie *Pinus caribaea* var. *caribaea* para a confecção de painéis homogêneos se encontra na Tabela 27 abaixo:

Tabela 27 - Composição granulométrica do pinus para painéis homogêneos

Peneira N°	D (mm)	Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
3/4"	19,10	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
1/2"	12,50	5,10	5,10	14,57%	14,57%	29,90	85,43
3/8"	9,52	5,50	10,60	15,71%	30,29%	24,40	69,71
1/4"	6,30	6,30	16,90	18,00%	48,29%	18,10	51,71
N° 4	4,75	3,80	20,70	10,86%	59,14%	14,30	40,86
N° 8	2,36	7,80	28,50	22,29%	81,43%	6,50	18,57
N° 16	1,19	3,70	32,20	10,57%	92,00%	2,80	8,00
Fundo	Fundo	2,60	34,80	7,43%	99,43%	0,20	0,57
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,20		0,57		3,26	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como ocorrido com as partículas de Eucalipto, as partículas de maravalha de Pinus se distribuíram principalmente entre as peneiras de abertura 12,5 a 2,36 mm, totalizando cerca de 81,43% do total do material retido nessa faixa granulométrica. Essa grande variação granulométrica, quando aplicada aos painéis homogêneos, pode ser prejudicial, ocorrendo o mesmo problema que houve com os painéis de Eucalipto, nos quais as partículas menores “caíram” por gravidade, formando assim duas superfícies diferentes para o mesmo painel.

Além de possuir uma grande porcentagem passante pela peneira de 1,19 mm, sendo 7,43% do total, esse material fino e residual prejudica o painel, pois acaba tendo uma superfície específica maior e, conseqüentemente, absorve uma quantidade maior de adesivo, o que reduz a adesão interna e externa do painel (JAGGER, 1992).

As composições granulométricas da face e do núcleo dos painéis heterogêneos se encontram nas Tabelas 28 e 29 a seguir:

Tabela 28 - Distribuição granulométrica do Pinus para as faces do painel heterogêneo

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
Nº	D (mm)						
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
Nº 4	4,75	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
Nº 8	2,36	1,70	1,70	4,86%	4,86%	33,30	95,14
Nº 16	1,19	27,40	29,10	78,29%	83,14%	5,90	16,86
Nº 20	0,084	5,80	34,90	16,57%	99,71%	0,10	0,29
Fundo	Fundo	0,00	34,90	0,00%	99,71%	0,10	0,29
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,20		0,57		1,88	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferentemente do que observado na Tabela 19 referente à composição granulométrica das faces do Eucalipto, a composição granulométrica das partículas menores de Pinus se encontram majoritariamente retidas na peneira de diâmetro de 1,19 mm, totalizando cerca de 78,29% do material total (para o Eucalipto, na peneira de diâmetro 1,19 mm, totalizavam cerca de 61,71%), sendo que, segundo Iwakiri (2005), a utilização de material fino na superfície dos painéis tem por objetivo conferir melhor acabamento superficial ao material, melhorando-o para ser aplicado em revestimentos.

Tabela 29 - Distribuição granulométrica do Pinus para o núcleo do painel heterogêneo

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
Nº	D (mm)						
3/4"	19,10	3,30	3,30	9,43%	9,43%	31,70	90,57
1/2"	12,50	6,80	10,10	19,43%	28,86%	24,90	71,14
3/8"	9,52	7,50	17,60	21,43%	50,29%	17,40	49,71
1/4"	6,30	6,50	24,10	18,57%	68,86%	10,90	31,14
Nº 4	4,75	5,40	29,50	15,43%	84,29%	5,50	15,71
Nº 8	2,36	5,00	34,50	14,29%	98,57%	0,50	1,43
Nº 16	1,19	0,40	34,90	1,14%	99,71%	0,10	0,29
Fundo	Fundo	0,00	34,90	0,00%	99,71%	0,10	0,29
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,10		0,29		4,40	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mostra a Tabela 29, a distribuição das partículas de resíduo do núcleo se tornou semelhante à utilizada para a confecção dos painéis homogêneos (Tabela 27). Vale ressaltar que a porcentagem de material retido na peneira com abertura de 19,1 mm foi cerca de 9,43%, um valor maior do que as maravalhas de Eucalipto retidas na mesma faixa, 3,43% (Tabela 20). Mesmo ambas as espécies sendo processadas utilizando-se a mesma metodologia, cada material produziu uma faixa granulométrica diferente, através das características individuais de cada espécie, como afirma Klímek *et al.* (2016) em seu estudo utilizando três tipos de flores diferentes para a produção de painéis aglomerados.

Vale ressaltar também que, para essa espécie em específico, as partículas do núcleo variaram entre as aberturas de 19,1 mm a 2,36 mm, um intervalo semelhante às aquelas que foram encontradas para as partículas de Eucalipto.

4.2.1.2 Densidade da partícula

Os valores referentes à densidade da partícula encontrada pelo método adaptado do balão volumétrico e a comparação com os encontrados nas literaturas estão nas Tabelas 30 e 31 mostradas a seguir:

Tabela 30 - Resultado da massa específica do Pinus (*Pinus caribaea* var. *caribaea*)

Espécie	M ₁ (g)	T (°C)	M ₂ (g)	M _s (g)	ρ _{al} (g/cm ³)	ρ _s (g/cm ³)
Pinus	545,8	28,50	546,85	5,00	0,789	0,652

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 31 - Comparativo do resultado da massa específica do Pinus com os encontrados nas literaturas

Literatura encontrada	Massa específica (g/cm ³)
Autor	0,652
Iwakiri (2010)	0,398 (<i>Caribaea</i>); 0,429 (<i>Bahamensis</i>)
Wang <i>et al.</i> (1999)	Entre 0,470 a 0,580
Silva Júnior (1993)	0,449; 0,505 e 0,624 (<i>Bahamensis</i>)

Fonte: Elaborado do autor.

Como pode ser visualizado nas referidas tabelas, o resultado obtido pelo ensaio se mostra bem superior àqueles fornecidos pela literatura. É válido mencionar que a madeira utilizada para confeccionar os painéis possuía idade de 33 anos, sendo a espécie de maior idade do presente estudo; o valor que mais se aproxima da massa específica calculada é o encontrado pelo autor Silva Júnior (1993), no qual a densidade da espécie *E. bahamensis* de 0,624 foi calculada como sendo material de resíduo de serraria.

A madeira do presente estudo se caracterizou com o valor de 0,652 g/cm³, logo, como de média densidade, de forma a ser utilizada para a obtenção dos valores de razão de compactação nominal e efetiva dos painéis aglomerados.

4.2.2 Avaliação das propriedades dos painéis

4.2.2.1 Densidade e Razão de Compactação

Nesta seção, são analisados os valores de densidade nominal e efetiva dos painéis homogêneos e heterogêneos produzidos com Pinus e suas respectivas razões de compactação.

Tabela 32 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Pinus

Proposta	Densidade nominal (g/cm ³)	Densidade efetiva (g/cm ³)	Razão de compactação nominal	Razão de compactação efetiva
P _{HO}	0,605	0,744 ^B (5,06) *	0,93	1,14
P _{HE}	0,616	0,786 ^A (1,52) *	0,94	1,21

Fonte: Acervo do autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Assim como ocorrido com os painéis produzidos com Eucalipto, os painéis tanto homogêneos quanto heterogêneos de Pinus apresentaram uma razão de compactação inferior àquela recomendada por Araújo *et al.* (2019), conforme visto na Tabela 32. Para casos como este, a literatura de Iwakiri (2005) recomenda a mistura de uma espécie de média densidade com outra que

possui uma densidade menor, com o objetivo de se aumentar a razão de compactação e, assim, melhorar as qualidades do painel.

Sendo assim, os painéis homogêneos de Pinus (P_{HO}) podem ser classificados como de média densidade e os painéis heterogêneos (P_{HE}) como de alta densidade, de acordo com a ABNT NBR 14810-1 (2013).

Tabela 33 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Pinus com encontrados nas literaturas

Nomenclatura	Teor de adesivo	Tipo de adesivo	Densidade efetiva
P_{HO} (Autor)	10%	PUR	0,744^B (5,06) *
P_{HE} (Autor)	12%	PUR	0,786^A (1,52) *
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	0,740
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	0,670
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	UF	0,750
100% Partículas de Pinus industrial (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	0,718
100% Tocos e raízes de Pinus (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	0,721
100% Topos e galhos das árvores de pinus (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	0,715
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>caribaea</i> (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2010)	8%	UF	0,687
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>bahamensis</i> (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2010)	8%	UF	0,694

Fonte: Elaborado pelo autor.

()* Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Conforme mostra a Tabela 33, a densidade dos painéis homogêneos de 0,743 g/cm³ ficou em uma faixa semelhante à dos painéis heterogêneos 0,786 g/cm³, mas obtendo uma diferença estatística significativa, sendo o aumento de 5,78% do valor entre ambos. A densidade encontrada na literatura que mais se aproximou com o que foi encontrado neste estudo se refere à pesquisa de Silva *et al.* (2021), que utilizou uma mistura de *Pinus ellioti* com *Pinus taeda*, obtendo valores de 0,740 e 0,650 g/cm³ para painéis de Pinus produzidos com PUR e 0,750 g/cm³ para painéis produzidos com UF.

O estudo realizado por Iwakiri *et al.* (2010), utilizando Pinus da espécie *caribaea* var. *caribaea*, obteve uma densidade de 0,694 g/cm³ utilizando uma

pressão de compactação de 5 MPa, com apenas 8% de adesivo em relação à massa seca. O estudo, porém, utilizou a espécie com 17 anos de idade, sendo que a selecionada no presente estudo possuía 33 anos quando extraída, o que pode, assim, ser uma hipótese para explicar a diferença entre densidades em relação ao mesmo material.

Em relação a todas as literaturas estudadas (SILVA *et al.*, 2021; IWAKIRI *et al.*, 2017; IWAKIRI *et al.*, 2010), a pressão de compactação variou entre 3,5 e 5 MPa, valores próximos aos utilizados no presente estudo, que, quando comparado na Tabela 33, mostra densidades próximas com aquelas obtidas no ensaio. Em relação à diferença das densidades entre as hipóteses trabalhadas, o valor foi de 0,043 g/cm³, o menor de todas as espécies do presente estudo.

4.2.2.2 *Propriedades físicas*

Os resultados dos ensaios de I24h, Absorção em água 24h (AA24h) e o Teor de umidade (T.U) referentes à espécie de Pinus são apresentados na Tabela 34 a seguir:

Tabela 34 - Resultado dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Pinus comparados com as literaturas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)
P_{HO} (Autor)	10%	PUR	22,61^A (21,55) *	83,51^A (15,53) *	5,07^B (8,23) *
P_{HE} (Autor)	12%	PUR	20,80^A (19,23) *	64,36^B (9,03) *	7,35^A (3,90) *
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	11,42	-	-
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	9,78	-	-
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	UF	9,75	-	-
100% Partículas de Pinus industrial (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	64,71	23,89	-
100% Tocos e raízes de Pinus (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	73,76	26,98	-
100% Topos e galhos das árvores de Pinus (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	51,49	18,85	-
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>caribaea</i> (IWAKIRI, <i>et al.</i> , 2010)	8%	UF	31,34	88,93	-
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>bahamensis</i> (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2010)	8%	UF	25,35	83,74	-
100% Pinus ssp (CABRAL <i>et al.</i> , 2017)	12%	PUR	11,77	100,45	-

Fonte: Acervo do autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Semelhantemente ao ocorrido com o Eucalipto, houve uma diminuição do I24h e da AA24h dos painéis do primeiro tratamento em relação aos painéis do segundo, sendo que, para o I24h, o valor era de 22,61%, em seguida sendo 20,80% com a diminuição de 8% e não havendo estatisticamente uma diferença significativa, e a AA24h, de 83,51% para 64,36%, reduzindo 22,9%, com o aumento de 2% do adesivo.

Mesmo com os resultados diminuídos, estes ainda se tornaram altos se comparados com os encontrados por Silva *et al.* (2021) e Cabral *et al.* (2017), que também usaram PUR, conforme mostrou anteriormente a Tabela 34. O presente estudo obteve resultados melhores aos encontrados no trabalho de Iwakiri *et al.* (2010), que utilizou as variedades *bahamensis* e *caribaea*, sendo

os valores de I24h e AA24h para ambas as espécies de 25,35% e 31,34% e, também, 83,74% e 88,93%, respectivamente.

É interessante ressaltar que, no estudo de Iwakiri *et al.* (2017), os painéis tiveram um comportamento diferente do ocorrido com todos os outros, obtendo um I24h muito maior que o esperado para as três misturas propostas, enquanto a AA24h se manteve baixa, sendo que, comparado ao presente estudo, os resultados de I24h foram maiores do que os encontrados na literatura.

Em relação ao T.U., houve um aumento de 46,9% dos painéis heterogêneos (7,36%) em relação aos painéis homogêneos (5,01%). Coincidentemente, o mesmo ocorreu com a espécie de Eucalipto, sendo válida a mesma hipótese que foi utilizada para o respectivo material, não prejudicada quando comparada aos parâmetros normativos, conforme será discutido no subitem 4.5.

4.2.2.3 *Propriedades mecânicas*

Os resultados referentes ao ensaio de tração e o ensaio de flexão, assim como a correlação com as respectivas literaturas estudadas, estão apresentados na Tabela 35 a seguir:

Tabela 35 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Pinus em comparação com as literaturas propostas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
P_{HO} (Autor)	10%	PUR	8,44^B (21,84) *	1.673^A (14,33) *	0,41^B (33,29) *
P_{HE} (Autor)	12%	PUR	11,21^A (14,33) *	1.831^A (9,30) *	0,68^A (29,25) *
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	17,00	1.462	2,18
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	PUR	16,67	1.369	1,73
100% Maravalha de Pinus (SILVA <i>et al.</i> , 2021)	15%	UF	15,83	1.665	1,08
100% Partículas de Pinus industrial (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	10,30	1.913	0,51
100% Tocos e raízes de Pinus (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	8,30	1.341	0,59
100% Topos e galhos das árvores de Pinus (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2017)	8%	UF	6,90	1.154	0,59
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>caribaea</i> (IWAKIRI, <i>et al.</i> , 2010)	8%	UF	16,73	2.326	1,07
100% <i>Pinus caribaea</i> . var. <i>bahamensis</i> (IWAKIRI <i>et al.</i> , 2010)	8%	UF	18,08	2.515	1,14
100% Pinus ssp (CABRAL <i>et al.</i> , 2017)	12%	PUR	8,73	1.266,72	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Como se pode observar na Tabela 35, para a proposta de Pinus para painéis homogêneos P_{HO}, foi resultada uma resistência à flexão MOR baixa de 8,45 MPa, mesmo assim, sendo maior do que a encontrada para a proposta realizada com Eucalipto E_{HO} de 6,92 MPa. O MOE também teve um aumento significativo de 16,7% em comparação do resultado obtido do Pinus, 1.673 MPa, em relação ao Eucalipto, 1.434 MPa.

Em comparação com a literatura escolhida, os resultados em que o MOR dos painéis homogêneos dessa espécie ficou em uma margem superior foram apenas aos da literatura de Iwakiri *et al.* (2017), para as misturas de 100% tocos e raízes de Pinus e 100% topos e galhos das árvores de Pinus, com valores de 8,30 MPa e 6,90 MPa, respectivamente.

O valor calculado no presente estudo para MOE, 1.673 MPa, ficou acima de todos os valores encontrados no estudo de Silva *et al.* (2021), Cabral *et al.* (2017) e para misturas de tocos e raízes de Pinus e topos e galhos das árvores de Pinus de Iwakiri *et al.* (2017), conforme pôde ser visto na Tabela 35.

Em relação à tração perpendicular da proposta de painéis homogêneos, o resultado obtido, 0,42 MPa, ficou abaixo de todos os valores das literaturas utilizadas para comparar os valores, resultado esse que pode ser explicado pela falta de estruturação do painel devido à grande dispersão granulométrica das partículas.

A proposta referente aos painéis heterogêneos P_{HE} obtiveram resultados de MOE, MOR e TP melhores do que os painéis homogêneos do primeiro tratamento, sendo os valores 11,22 MPa, 1.831 MPa e 0,68 MPa, respectivamente. A reorganização das partículas, assim como ocorrido com o Eucalipto, proporcionou um aumento na resistência dos painéis, sendo os resultados com Pinus inferiores aos do Eucalipto (Tabela 26).

Comparando com a literatura, o resultado de MOR ficou acima das três propostas de Iwakiri *et al.* (2017) e de Cabral *et al.* (2017), sendo os valores 10,30; 8,30; 6,90 e 8,73 MPa, respectivamente. O presente estudo, quando comparado ao trabalho de Silva *et al.* (2021) e Iwakiri *et al.* (2010), não obteve nenhum resultado superior, sendo uma das hipóteses que explica os resultados de Silva *et al.* (2021) a resina utilizada com 15% em relação ao peso seco, e, para ambos os estudos, a geometria da partícula e o fator de compactação como fatores influentes nas propriedades dos painéis.

Em contrapartida, o resultado de MOE do segundo tratamento, 1.831 MPa, se mostrou maior quando comparado com as literaturas de Silva *et al.* (2021) e Cabral *et al.* (2017), e também para misturas de topos e galhos das árvores de Pinus e tocos e raízes de Iwakiri *et al.* (2017), conforme pôde ser visto na Tabela 35.

Os resultados em que o painel não foi superior se referem às variedades *caribaea* e *bahamensis* estudadas por Iwakiri *et al.* (2010), sendo de 2.326 e 2.515 MPa, nos quais os valores do fator de compactação das misturas utilizadas foram 1,726 e 1,618 MPa, o que pode explicar a melhora significativa das propriedades. Outro valor de MOE referente à mistura de Pinus industrial proposta por Iwakiri *et al.* (2017), à qual o presente estudo obteve um resultado

inferior, foi de 1.913 Mpa, sendo ambas as pesquisas realizadas com um teor de adesivo mais baixo (8%) que o estudo proposto.

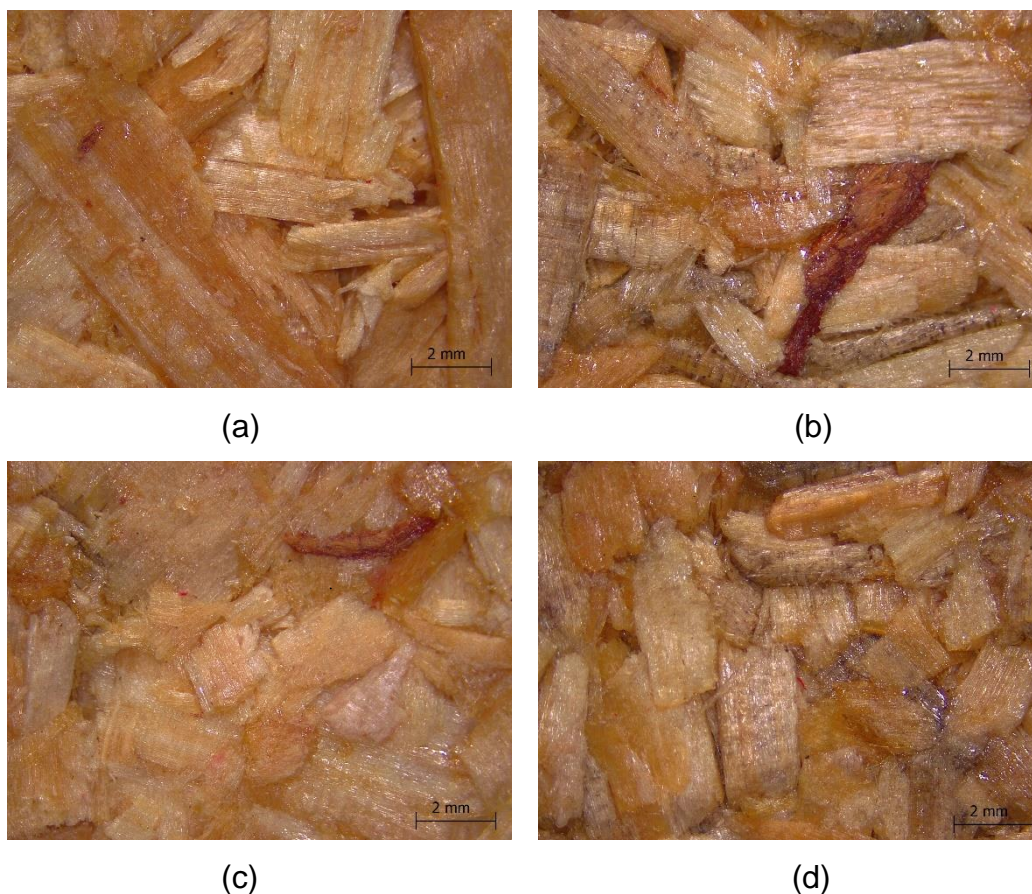
Em relação à T.P. dos painéis heterogêneos de Pinus, os resultados foram superiores aos calculados nos painéis homogêneos, com valores de 0,68 e 0,42 MPa respectivamente, aumentando 61,09% quando comparados ambos os tratamentos, sendo o resultado inferior ao encontrado para os painéis heterogêneos de Eucalipto, 0,81 MPa.

Quando comparados com a literatura, os únicos resultados aos quais o segundo tratamento foi superior estão relacionados às três misturas propostas por Iwakiri *et al.* (2017), com resultados de 0,51; 0,59 e 0,59 MPa, sendo que as outras literaturas – Silva *et al.* (2021) e Iwakiri *et al.* (2010) – obtiveram valores muito superiores àqueles encontrados, podendo ser observados na Tabela 35.

4.2.3 Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada

A utilização da lupa para análise visual dos corpos de prova pode ser analisada por meio das Figuras 34 e 35 a seguir:

Figura 34 - Detalhes dos corpos de prova de Pinus, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos



Fonte: Acervo do autor.

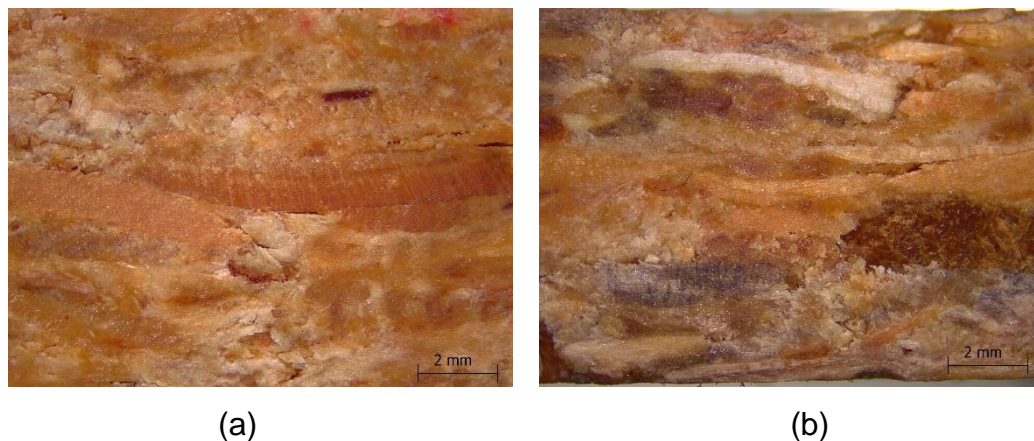
Pelo fato de a composição granulométrica do Pinus ter sido semelhante à composição granulométrica do Eucalipto, os problemas encontrados em relação à fabricação de ambos os painéis foram parecidos. Ainda assim, é possível observar, através do comparativo dos detalhes (a) e (c), uma maior interação das partículas quando comparadas com os painéis confeccionados de Eucalipto na Figura 32.

Nas Figuras 34 (b) e (d), é possível observar uma maior ordenação devido à mudança no processo de fabricação dos painéis, sendo notável também pequenos espaços vazios entre as partículas, que podem ser prejudiciais para a resistência do painel.

O efeito de “queda” das partículas, observado também nos painéis de Eucalipto, pode ser observado no detalhe (c), no qual a maior porcentagem de

passante (7,43%) na peneira com abertura de 1,18 mm, classificado como finos, desceu devido ao fato de a dispersão granulométrica ser elevada.

Figura 35 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Pinus, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo



Fonte: Acervo do autor.

Diferentemente do ocorrido com os painéis homogêneos de Eucalipto, os painéis de Pinus mostraram uma boa compactação aparente, mesmo com valores abaixo do recomendado por Araújo *et al.* (2019), conforme pode ser visto na Figura 35, no detalhe (a). Ao se observar o detalhe (b), também não é possível notar a divisão das camadas de Pinus que foram utilizadas nas faixas granulométricas, o que pode também classificar esses painéis como sendo heterogêneos com camadas graduadas.

Com isso, é possível previamente concluir que, conforme ocorrido nos estudos de Gava *et al.* (2015) e Bueno (2015), e através dos resultados da análise estatística, a alteração da formação do painel resultou em melhorias principalmente nas propriedades mecânicas da espécie de Pinus.

4.3 *Hevea brasiliensis* (Seringueira)

4.3.1 Avaliação das propriedades das partículas

4.3.1.1 Composição granulométrica

A terceira espécie da qual foram estudadas as propriedades para se fazer os painéis foi a *Hevea brasiliensis*, popularmente conhecida como Seringueira. Para essa espécie em específico, não se conseguiu produzir os painéis com a madeira processada na mesma umidade, o que levou a uma diferenciação significativa nas propriedades e nas características granulométricas em questão, o que é mais profundamente discutido nesta seção. A Tabela 36 a seguir informa o resultado obtido com o ensaio de composição granulométrica da partícula obtida no processamento com umidade saturada para a confecção dos painéis homogêneos.

Tabela 36 - Composição granulométrica da Seringueira para painéis homogêneos

Peneira	Massa	Massa	%	% Retido	Massa	% Massa	
N°	D	(g)	Acumulada	Retido	Acumulado	Passante	Passante
	(mm)		(g)			(g)	
3/4"	19,10	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
1/2"	12,50	2,00	2,00	5,71%	5,71%	33,00	94,29
3/8"	9,52	2,40	4,40	6,86%	12,57%	30,60	87,43
1/4"	6,30	3,80	8,20	10,86%	23,43%	26,80	76,57
N° 4	4,75	3,90	12,10	11,14%	34,57%	22,90	65,43
N° 8	2,36	11,90	24,00	34,00%	68,57%	11,00	31,43
N° 16	1,19	6,60	30,60	18,86%	87,43%	4,40	12,57
Fundo	Fundo	4,20	34,80	12,00%	99,43%	0,20	0,57
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,20		0,57		2,32	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser visto na Tabela 36, a faixa granulométrica em que as partículas de Seringueira ficaram dispostas foi bastante diferente da encontrada para Eucalipto e Pinus, ficando majoritariamente entre as aberturas de 6,30 a 1,19mm e totalizando cerca de 74,86% de todo o material retido. É importante destacar que o material caracterizado como fundo correspondeu a cerca de 12% do total das partículas, um valor superior ao que foi encontrado para Eucalipto (6,29%) e para Pinus (7,43%), visto que esse material foi

processado em sua forma toda saturada, como mostra a Figura 16 na seção de material e métodos.

Essa pequena dispersão da faixa granulométrica, para esse primeiro tratamento, garantiu à Seringueira melhores resultados em seus painéis, os quais serão discutidos nos subitens abaixo. Para o segundo tratamento, a espécie precisou ser reprocessada em uma umidade diferente, aproximadamente 12%, pois as toras já estavam secas e, de acordo com Iwakiri (2005), a mudança da umidade no processamento das partículas influencia na quantidade de finos gerados, além também de alterar a geometria da partícula.

Tabela 37 - Distribuição granulométrica da Seringueira para as faces do painel heterogêneo

Peneira	Massa	Massa	%	% Retido	Massa	% Massa	
N°	D (mm)	(g)	Acumulada (g)	Retido	Acumulado	Passante (g)	Passante
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
N° 4	4,75	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
N° 8	2,36	8,20	8,20	23,43%	23,43%	26,80	76,57
N° 16	1,19	22,10	30,30	63,14%	86,57%	4,70	13,43
N° 20	0,084	4,40	34,70	12,57%	99,14%	0,30	0,86
Fundo	Fundo	0,10	34,80	0,29%	99,43%	0,20	0,57
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,20		0,57		2,09	

Fonte: Acervo do autor.

Conforme pode ser observado na Tabela 37, a distribuição granulométrica para a produção dos painéis heterogêneos de Seringueira se mostra semelhante às utilizadas para Pinus e Eucalipto, sendo que a grande parte do material retido se encontra variando entre as peneiras de 2,36 mm e 1,19 mm, totalizando cerca de 86,57% do material total, sendo importante a contribuição dessas partículas para o acabamento do painel e a distribuição uniforme da carga aplicada.

Tabela 38 - Distribuição granulométrica da Seringueira para o núcleo do painel heterogêneo

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
Nº	D (mm)						
3/4"	19,10	1,10	1,10	3,14%	3,14%	33,90	96,86
1/2"	12,50	3,80	4,90	10,86%	14,00%	30,10	86,00
3/8"	9,52	5,40	10,30	15,43%	29,43%	24,70	70,57
1/4"	6,30	6,70	17,00	19,14%	48,57%	18,00	51,43
Nº 4	4,75	5,70	22,70	16,29%	64,86%	12,30	35,14
Nº 8	2,36	10,60	33,30	30,29%	95,14%	1,70	4,86
Nº 16	1,19	1,60	34,90	4,57%	99,71%	0,10	0,29
Fundo	Fundo	0,00	34,90	0,00%	99,71%	0,10	0,29
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,10		0,29		3,55	

Fonte: Acervo do autor.

Diferentemente da Tabela 36, que não mostra nenhuma partícula acima da malha de abertura com 6,3 mm, a Tabela 38 apresenta os resultados com partículas de maravalha processadas com uma umidade inferior à da utilizada no primeiro tratamento. Como é possível observar, a faixa granulométrica dessa proposta aumentou significativamente, obtendo partículas nas faixas de 19,1 mm (3,14%), 12,5 mm (10,86%) e 9,52 mm (15,43%), totalizando 29,43% das 35 gramas utilizadas. Essa variação granulométrica, correspondendo a 92% entre as aberturas de 12,5 mm a 2,36 mm, se aproximou das utilizadas para Eucalipto e Pinus, se diferenciando em relação às partículas utilizadas para a produção dos painéis homogêneos.

4.3.1.2 Densidade de partícula

A densidade da Seringueira foi calculada com uma média dos dois tratamentos utilizados, por se tratar de duas variações de partículas diferentes, sendo os valores informados nas Tabelas 39 e 40 abaixo:

Tabela 39 - Resultado da massa específica média da Seringueira (*Hevea brasiliensis*)

Espécie	M1 (g)	T (°C)	M2 (g)	Ms (g)	pal (g/cm ³)	Ps (g/cm ³)
Seringueira	545,8	28,00	547,06	5,00	0,789	0,630

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 40 - Comparativo do resultado da massa específica da Seringueira com os encontrados nas literaturas

Literatura encontrada	Massa específica (g/cm ³)
Autor	0,630
Oliveira Júnior (2011)	0,778; 0,658 e 0,616
Leonello (2011)	0,594 e 0,581
Lim; Gan e Choo (2003)	0,480 - 0,650

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 40 é possível observar que a densidade encontrada da Seringueira, de 0,630 g/cm³ (informada na Tabela 39), se encontra no intervalo calculado nas literaturas de Lim; Gan e Choo (2003), com valores variando entre 0,480 e 0,650 g/cm³, e na de Oliveira Junior (2011), que obteve densidades variando em relação à umidade da madeira, sendo de 37,12% com valores de 0,778 e 0,658 g/cm³, respectivamente. O estudo realizado por Leonello (2011) utilizando o mesmo clone que o presente estudo (RRIM600) obteve valores de 0,594 e 0,581 g/cm³ para seus discos calculados, sendo estes inferiores ao encontrado no material particulado.

Assim, a partícula de madeira pode ser classificada como de média densidade, de acordo com Silveira, Rezende & Vale (2013). Com o valor de massa específica obtido, foram calculadas as razões de compactação nominal efetiva dos painéis aglomerados.

4.3.2 Avaliação das propriedades dos painéis

4.3.2.1 Densidade e Razão de Compactação

Os resultados referentes às densidades das duas hipóteses propostas, assim como a razão de compactação nominal e efetiva, estão informados na Tabela 41 abaixo.

Tabela 41 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Seringueira

Proposta	Densidade nominal (g/cm ³)	Densidade efetiva (g/cm ³)	Razão de compactação nominal	Razão de compactação efetivo
S _{HO}	0,605	0,693 ^B (2,53) *	0,96	1,10
S _{HE}	0,616	0,745 ^A (2,92) *	0,98	1,18

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Assim como ocorrido com as duas espécies trabalhadas nas seções anteriores, a razão de compactação efetiva não atingiu os valores tidos como parâmetros tanto para os painéis homogêneos quanto para os heterogêneos e informados pela literatura de Araújo *et al.* (2019), sendo o máximo recomendado por Iwakiri (2005) a razão de compactação de 1,3.

Um dos fatores que podem influir no resultado da densidade está relacionado com a pressão de prensagem, que já se mostrou bem alta quando comparada com as outras literaturas que produziram painéis (SILVA *et al.*, 2021; FARIA *et al.*, 2020; CABRAL *et al.*, 2017), sendo necessário o reajuste de outros parâmetros para otimizar a razão de compactação.

Assim, através da densidade efetiva, é possível classificar os painéis de acordo com o parâmetro normativo da NBR 14810-1 (ABNT, 2013), sendo os painéis S_{HO} e S_{HE} classificados como de média densidade (0,550 a 0,750 g/cm³).

Tabela 42 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Seringueira com encontrados nas literaturas

Nomenclatura	Teor de adesivo	Tipo de adesivo	Densidade efetiva
S_{HO} (Autor)	10%	PUR	0,693 ^B (2,53) *
S_{HE} (Autor)	12%	PUR	0,745 ^A (2,92) *
30% Seringueira e 70% Teca (GILIO et al., 2021)	10%	PUR	0,720
100% Seringueira (FARIA et al., 2020)	8%	UF	0,525
100% Seringueira (IWARIKI et al., 2018)	8%	UF	0,751
Painéis homogêneos de Seringueira (GAVA et al., 2015)	12%	PUR	0,843
Painéis heterogêneos de Seringueira (GAVA et al., 2015)	12%	PUR	0,880

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Comparado com a literatura proposta, (GILIO et al., 2021; FARIA et al., 2020; IWAKIRI et al., 2018; GAVA et al., 2015), os valores de densidade obtidos se encontram na faixa proposta pelos resultados, que variam de 0,525 a 0,880 g/cm³, citados nas literaturas acima. É importante ressaltar que os valores de pressão utilizados nas pesquisas supracitadas variam entre 4,0 MPa e 5,0MPa, enquanto a densidade proposta para a confecção dos painéis variou de 0,650, 0,600, 0,750 e 0,800 g/cm³, respectivamente, resultando, assim, valores parecidos, como informa a Tabela 42.

A diferença das médias de densidades entre os tratamentos foi cerca de 0,052 g/cm³, valor referente não apenas ao aumento do adesivo ou à reorganização das partículas, mas também à grande diferenciação das partículas, não sendo possível afirmar o motivo da grande dispersão da densidade, como ocorreu com o Eucalipto, que foi produzido com os materiais nos mesmos parâmetros.

4.3.2.2 Propriedades físicas

Assim como realizado com as outras espécies, os resultados referentes aos ensaios físicos com Seringueira estão dispostos na Tabela 43 a seguir:

Tabela 43 - Resultado dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Seringueira comparados com as literaturas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	I 24h (%)	AA 24h (%)	T.U (%)
S_{HO} (Autor)	10%	PUR	15,85^B (14,55) *	78,03^A (14,12) *	4,72^B (10,70) *
S_{HE} (Autor)	12%	PUR	22,99^A (11,24) *	76,56^A (3,50) *	6,45^A (4,06) *
30% Seringueira e 70% Teca (GILIO <i>et al.</i> , 2021)	10%	PUR	10,49	-	7,97
100% Seringueira (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	8%	UF	12,75	99,74	7,42
100% Seringueira (IWARIKI <i>et al.</i> , 2018)	8%	UF	35,55	76,77	-
Painéis homogêneos de Seringueira (GAVA <i>et al.</i> , 2015)	12%	PUR	17,09	38,80	5,74
Painéis heterogêneos de Seringueira (GAVA <i>et al.</i> , 2015)	12%	PUR	14,88	37,80	6,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Como pode ser visto na Tabela 43, os valores entre os dois tratamentos não seguiram conforme o ocorrido com as duas espécies anteriores de Eucalipto e Pinus, havendo um aumento da espessura de 45,05% dos painéis heterogêneos S_{HE} (22,99%) em relação aos painéis homogêneos S_{HO} (15,85%). Mesmo utilizando 2% de adesivo a mais, este resultado mostra o quão significativa a influência da umidade no processamento da partícula pode ser nas propriedades físicas do painel, sendo o I24h dos painéis heterogêneos o maior valor encontrado em comparativo com as demais espécies.

Em relação à AA24h, houve uma pequena diminuição (1,88%) quando em comparação às duas outras espécies, sendo o valor de 76,56% para painéis heterogêneos e 78,03% para os homogêneos, também sendo esses valores com médias estatisticamente equivalentes. Para o teor de umidade, o ensaio sofreu um aumento de 36,36% dos painéis homogêneos (4,72%) em relação aos heterogêneos (6,45%), conforme ocorrido com as outras espécies.

Em comparação com a literatura proposta, para o I24h, os painéis do primeiro tratamento obtiveram um resultado superior aos de Faria *et al.* (2020), de Iwakiri *et al.* (2018) e aos painéis homogêneos de Gava *et al.* (2015), sendo os valores 12,75%, 35,55% e 17,09%, nos quais os primeiros dois autores

citados utilizaram 8% da resina UF, não resistente à água, e o último utilizou 12% de PUR, sendo que, para os painéis do segundo tratamento, o único valor superior ao calculado foi o encontrado por Iwariki *et al.* (2018), sendo todos os outros valores inferiores ao obtido.

Em relação à AA24h, os resultados informados por Gava *et al.* (2015) foram os únicos inferiores aos valores obtidos, sendo de 38,80% e 38,70% comparados com o segundo tratamento, e, além desses valores informados, para os painéis do primeiro tratamento, houve o valor de 76,77% encontrado na literatura de Iwakiri *et al.* (2018). Os baixos valores dos ensaios físicos propostos por Gilio *et al.* (2021) ocorreram devido ao fato de o painel ser um material híbrido, com Seringueira e Teca, pois Teca possui baixa adesão à água (GARCIA & MARINONIO, 2016).

Por fim, o T.U. dos painéis homogêneos foram os menores encontrados quando comparados com todas as literaturas propostas (GILIO *et al.*, 2021; FARIA *et al.*, 2020; IWAKIRI *et al.*, 2018; GAVA *et al.*, 2015), enquanto em relação ao valor para os painéis heterogêneos, os únicos superiores foram os encontrados pelos dois primeiros autores citados, sendo os valores de 7,97% e 7,42%, respectivamente.

4.3.2.3 Propriedades mecânicas

Os resultados referentes aos ensaios mecânicos realizados com a espécie *Hevea brasiliensis* são mostrados na Tabela 44 a seguir:

Tabela 44 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Seringueira em comparação com as literaturas propostas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
S_{HO} (Autor)	10%	PUR	12,46^A (9,94) *	2.232^A (8,10) *	0,92^A (10,10) *
S_{HE} (Autor)	12%	PUR	8,53^B (15,13) *	1.589^B (7,40) *	0,84^A (14,64) *
30% Seringueira e 70% Teca (GILIO <i>et al.</i> , 2021)	10%	PUR	18,60	2.468	1,06
100% Seringueira (FARIA <i>et al.</i> , 2020)	8%	UF	9,87	1.054	0,56
100% Seringueira Pinus (IWARIKI <i>et al.</i> , 2018)	8%	UF	14,5	2.205	0,78
Painéis homogêneos de Seringueira (GAVA <i>et al.</i> , 2015)	12%	PUR	13,21	1.893	2,68
Painéis heterogêneos de Seringueira (GAVA <i>et al.</i> , 2015)	12%	PUR	18,79	2.595	3,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Conforme se observa na Tabela 44, a mudança da geometria e das propriedades da partícula também prejudicou as propriedades mecânicas dos painéis, tendo uma diminuição de 31,54% da resistência à flexão estática (MOR) dos painéis heterogêneos (8,53 MPa) em relação aos painéis homogêneos (12,46 MPa), diminuindo também o módulo de elasticidade (MOE) em 28,81% quando comparado com os painéis do segundo tratamento (1.589 MPa) em relação aos do primeiro tratamento (2.232 MPa).

A menor diminuição das propriedades ocorreu com a Tração Perpendicular (T.P), sendo cerca de 8,7% em relação à proposta S_{HE} (0,84 MPa) e em relação à proposta S_{HO} (0,92 MPa), sendo o valor para S_{HO} o maior valor encontrado na tração no presente estudo, considerando os valores de tração como equivalentes estatisticamente.

Em comparação com a literatura (GILIO *et al.*, 2021; FARIA *et al.*, 2020; IWAKIRI *et al.*, 2018; GAVA *et al.*, 2015), os painéis homogêneos de Seringueira utilizados na proposta do primeiro tratamento obtiveram valor de MOE superior apenas ao resultado de Faria *et al.* (2020), sendo de 9,87 MPa o valor encontrado pelo autor, usando 8% de resina UF em relação ao peso seco.

Além dos resultados para MOE obtidos por Faria *et al.* (2020), o presente estudo também obteve resultado de MOE superiores aos encontrados nas literaturas de Iwakiri *et al.* (2018) e aos dos painéis homogêneos produzidos por Gava *et al.* (2015), sendo os respectivos valores de 1.054, 2.205 e 1.893 MPa, nos quais os primeiros dois autores supracitados utilizaram cerca de 8% de adesivo UF e, no último, os autores usaram 12% de PUR e resíduo de seringueira com partículas passantes na peneira de 20 *mesh*.

Ainda analisando o resultado de Tração Perpendicular para a proposta S_{HO}, os valores em que este obteve um melhor desempenho estão relacionados às literaturas de Faria *et al.* (2020) e Iwakiri *et al.* (2018), nas quais ambos obtiveram valores de 0,56 e 0,78 MPa, com 8% de resina UF aplicada aos painéis.

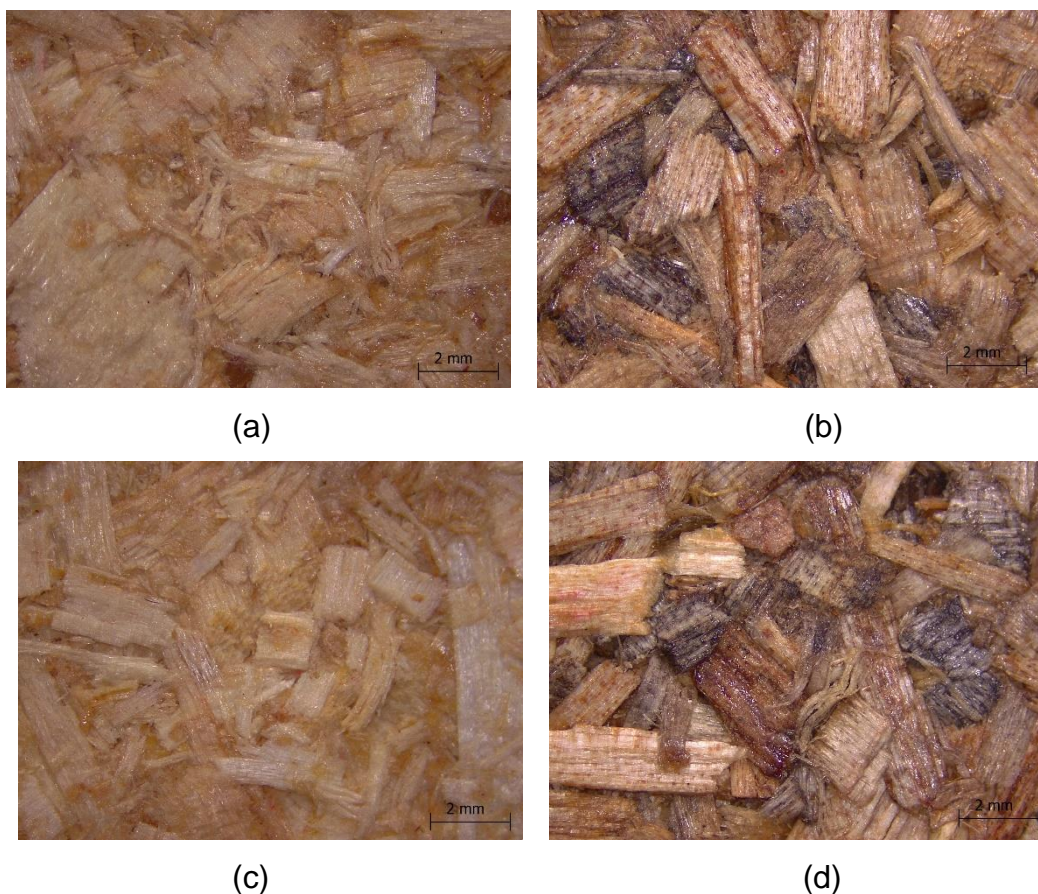
Em relação à proposta do segundo tratamento para esta espécie, o resultado obtido de MOR, 8,54 MPa, foi o menor resultado para a resistência, conforme mostra a Tabela 44. Para os resultados de MOE, mesmo a resistência tendo caído significativamente, o valor calculado (1.590 MPa) foi superior ao encontrado por Faria *et al.* (2020), de 1.054 MPa para o painel produzido com 100% de partículas de seringueira.

Na tração, o resultado dos painéis heterogêneos de Seringueira foi superior a ambos os painéis de Eucalipto e Pinus, dos quais os valores se encontram nas Tabelas 26 e 37, respectivamente. Em relação à literatura usada para os comparativos, apenas os resultados de Faria *et al.* (2020) e Iwakiri *et al.* (2018) ficaram abaixo do valor calculado, assim como o foi para os painéis homogêneos mostrados acima.

4.3.3 Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada

Para o melhor entendimento do ocorrido com os painéis de Seringueira, foi realizado um aumento de 8 vezes nas duas faces dos painéis, além do perfil da sua seção transversal, conforme indicam as Figuras 36 e 37 a seguir, com escala representada na imagem:

Figura 36 - Detalhes dos corpos de prova de Seringueira, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos



Fonte: acervo do autor.

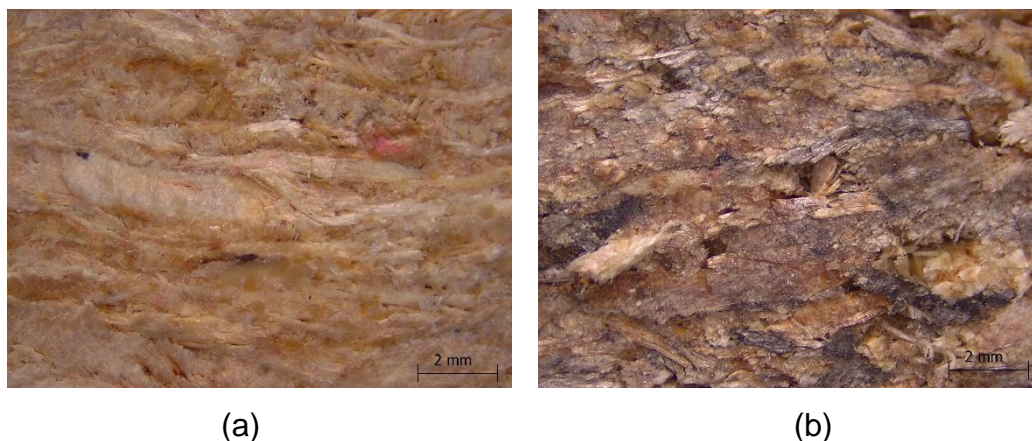
Conforme pode ser observado no detalhe (a), para os painéis homogêneos de Seringueira não ocorreu o efeito de “queda” da partícula de forma tão brusca ao ponto de formar grandes vazios na estrutura, como pôde se observar no detalhe (a) da Figura 32, da espécie do Eucalipto. Para as partículas da face inferior (c) dos painéis homogêneos, a distribuição mostra-se um pouco mais aglutinada, sendo o material proposto no primeiro tratamento de característica fibrosa e, devido a isso, os resultados de MOR e MOE para essa proposta foram superiores aos outros painéis para esse tratamento.

Já para o segundo tratamento, as partículas escolhidas adquiriram uma característica mais geométrica do que “fibrosa”, como aconteceu para os painéis homogêneos. Através dos detalhes (b) e (d) é possível observar uma ordenação característica das outras espécies que também foram utilizadas

para a confecção dos painéis heterogêneos; a diferenciação na coloração do painel se dá pela mudança da umidade e da secagem da tora antes do processo de aplainamento na plaina desengrossadeira.

Uma hipótese que se pode explorar futuramente é a análise da mudança das propriedades das partículas de seringueira através de ensaios químicos, que se comprovem informando o teor de lignina, celulose, holocelulose, teor de extrativos e teor de cinzas de ambos os tratamentos propostos, correlacionando não apenas as características físicas dos painéis, mas também as mecânicas.

Figura 37 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Seringueira, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo



Fonte: acervo do autor.

Conforme pode ser visto na Figura 37, visualmente, as partículas de Seringueira produzidas com a umidade saturada se mostraram melhor compactadas quando comparadas com as partículas produzidas com umidade a 12%, o que se vê no detalhe (b) pelos espaços vazios devido à compactação deficiente. Isso se dá pela composição granulométrica descrita no subitem 4.3.1, já que, para o primeiro tratamento, a maior dimensão das partículas se baseava na abertura de 6,3 mm, enquanto, no segundo tratamento, nas dimensões do núcleo, as partículas chegaram a 19,1 mm.

É válido destacar que a diminuição da umidade na fabricação das partículas de Seringueira acabou prejudicando as propriedades do material, nas interações resina/partícula, pois, mesmo com o aumento em 2% do teor de

adesivo da primeira proposta em relação à segunda, os resultados dos ensaios foram inferiores ao que se esperava. Assim, não foi possível, através da modelagem estatística, concluir se a reestruturação do painel ocasionou, para esta espécie, uma melhora em suas propriedades.

4.4 *Tectona grandis* (Teca)

4.4.1 *Avaliação das propriedades das partículas*

4.4.1.1 *Composição granulométrica*

Os valores referentes à composição granulométrica da espécie *Tectona Grandis* se encontram nas Tabelas 45, 46 e 47 explicitadas a seguir, nas quais, para ambos os tratamentos, foram utilizados os mesmos materiais conforme foi realizado com as espécies de Eucalipto e Pinus.

Tabela 45 - Composição granulométrica da Teca para painéis homogêneos

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
Nº	D (mm)						
3/4"	19,10	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
3/8"	9,52	2,10	2,10	6,00%	6,00%	32,90	94,00
1/4"	6,30	6,40	8,50	18,29%	24,29%	26,50	75,71
Nº 4	4,75	5,90	14,40	16,86%	41,14%	20,60	58,86
Nº 8	2,36	11,30	25,70	32,29%	73,43%	9,30	26,57
Nº 16	1,19	5,10	30,80	14,57%	88,00%	4,20	12,00
Fundo	Fundo	4,00	34,80	11,43%	99,43%	0,20	0,57
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,20		0,57		2,33	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser observado na Tabela 45, a espécie Teca obteve um comportamento granulométrico aparentemente semelhante ao da Seringueira, com partículas se concentrando majoritariamente nas faixas de aberturas entre 6,3 mm e 1,19 mm, totalizando cerca de 82,01% das partículas usadas na realização do ensaio. O material residual também se apresentou em grande quantidade, equivalendo a 11,43% de todo o material ensaiado, a segunda

maior quantidade, inferior apenas à da Seringueira com 12%, não podendo desconsiderar cerca de 6% do material retido na peneira 9,52 mm.

Tabela 46 - Distribuição granulométrica da Teca para as faces do painel heterogêneo

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
Nº	D (mm)						
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
Nº 4	4,75	0,00	0,00	0,00%	0,00%	35,00	100,00
Nº 8	2,36	2,30	2,30	6,57%	6,57%	32,70	93,43
Nº 16	1,19	25,40	27,70	72,57%	79,14%	7,30	20,86
Nº 20	0,084	7,20	34,90	20,57%	99,71%	0,10	0,29
Fundo	Fundo	0,00	34,90	0,00%	99,71%	0,10	0,29
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,10		0,29		1,85	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme se observa na Tabela 46, a distribuição granulométrica do material utilizado para as faces dos painéis heterogêneos produzidos se assemelhou com a distribuição para a espécie de Pinus, com partículas se concentrando no intervalo que varia de 1,19 e 0,084 mm, totalizando 93,14% do material utilizado (35g), enquanto o núcleo do painel apresentou um comportamento semelhante ao da Seringueira, conforme pode ser analisado na Tabela 47 a seguir:

Tabela 47 - Distribuição granulométrica da Teca para o núcleo do painel heterogêneo

Peneira		Massa (g)	Massa Acumulada (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Passante (g)	% Massa Passante
Nº	D (mm)						
3/4"	19,10	1,30	1,30	3,71%	3,71%	33,70	96,29
1/2"	12,50	7,60	8,90	21,71%	25,43%	26,10	74,57
3/8"	9,52	5,80	14,70	16,57%	42,00%	20,30	58,00
1/4"	6,30	6,60	21,30	18,86%	60,86%	13,70	39,14
Nº 4	4,75	7,00	28,30	20,00%	80,86%	6,70	19,14
Nº 8	2,36	5,90	34,20	16,86%	97,71%	0,80	2,29
Nº 16	1,19	0,60	34,80	1,71%	99,43%	0,20	0,57
Fundo	Fundo	0,00	34,80	0,00%	99,43%	0,20	0,57
Massa de ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de finura	
35,00		0,20		0,57		4,10	

Fonte: Acervo do autor.

Conforme observado na Tabela 47, a maior quantidade de partículas se encontra entre as peneiras de abertura 12,50 a 2,36 mm, correspondente a 94% do total utilizado para a realização do ensaio, dispersão semelhante à da Seringueira processada com 12% de umidade, que totalizou cerca de 92%, obtendo um aumento significativo das partículas de abertura de 19,1 mm (3,71%), 12,5 mm (21,71%) e 9,52 mm (16,57%), sendo também um material com uma maior dispersão granulométrica quando comparado ao utilizado para se produzir painéis homogêneos.

4.4.1.2 Densidade da partícula

É possível observar, nas Tabelas 48 e 49 a seguir, o resultado do ensaio de massa específica, que informa os resultados da densidade da partícula, e a comparação das respectivas literaturas usadas para a classificação das partículas da madeira Teca.

Tabela 48 - Resultado da massa específica da Teca (*Tectona grandis*)

Espécie	M ₁ (g)	T (°C)	M ₂ (g)	M _s (g)	ρ _{al} (g/cm ³)	ρ _s (g/cm ³)
Teca	545,3	28,50	546,85	5,00	0,789	0,602

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme se pode analisar na Tabela 48, o valor referente à massa específica da Teca de 0,602 g/cm³ foi o menor valor encontrado pelo respectivo ensaio, sendo os valores de Eucalipto, Pinus e Seringueira de 0,665, 0,652 e 0,630 g/cm³, respectivamente.

Tabela 49 - Comparativo do resultado da massa específica da Teca com os encontrados nas literaturas

Literatura encontrada	Massa específica (g/cm ³)
Autor	0,602
Garcia e Marinonio (2016)	Entre 0,440 a 0,820
Flórez (2012)	0,550
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2021)	0,660

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme demonstrado na Tabela 49, o valor de massa específica da Teca foi o valor mais próximo com aquele relatado pela literatura, indicado nos resultados encontrados por Garcia & Marinonio (2016) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2021), com valores entre 0,440 e 0,820 g/cm³ para a primeira literatura e 0,660 g/cm³ para a segunda, sendo apenas a literatura de Flórez (2012), com valor informado de 0,550 g/cm³, distante do calculado.

Com isso, segundo Silveira, Rezende & Vale (2013), pode-se classificar as partículas usadas de Teca como de média densidade, sendo o resultado obtido usado para se calcular a razão de compactação nominal e efetiva.

4.4.2 Avaliação das propriedades dos painéis

4.4.2.1 Densidade e Razão de Compactação

Nas Tabelas 50 e 51 a seguir, é possível analisar os valores de densidade calculada dos painéis, a razão de compactação nominal e efetiva e a comparação da densidade efetiva com as respectivas literaturas da espécie de *Tectona grandis*.

Tabela 50 - Resultados de densidade nominal, densidade efetiva e razão de compactação dos painéis confeccionados com Teca

Proposta	Densidade nominal (g/cm ³)	Densidade efetiva (g/cm ³)	Razão de compactação nominal	Razão de compactação efetivo
T _{HO}	0,605	0,685 ^B (2,78) *	1,00	1,14
T _{HE}	0,616	0,730 ^A (2,02) *	1,02	1,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Assim como ocorrido com as outras três espécies estudadas – Eucalipto, Pinus e Seringueira –, a espécie de Teca obteve valores de razão de compactação efetiva inferiores a 1,3, sugerido por Iwakiri (2005) e por Araújo *et al.* (2019), sendo a presente espécie a única dentre as quatro que a razão de compactação nominal foi igual ou maior que 1,00 (Tabela 50).

Sendo necessário aplicar as mesmas considerações que foram realizadas para as outras espécies, de acordo com a NBR 14810-1 (ABNT, 2013), tanto o T_{HO} (0,685 g/cm³) como o T_{HE} (0,730 g/cm³) foram classificados como painéis de média densidade, para os quais a norma cita o intervalo entre 0,550 e 0,750 g/cm³.

Tabela 51 - Comparativo da densidade dos painéis confeccionados de Teca com encontrados nas literaturas

Nomenclatura	Teor de adesivo	Tipo de adesivo	Densidade efetiva
T_{HO} (Autor)	10%	PUR	0,685 ^B (2,78) *
T_{HE} (Autor)	12%	PUR	0,730 ^A (2,02) *
100% Teca (CELESTINO, 2020)	10%	PUR	0,750
100% Teca (DIAS, 2020)	12%	PUR	0,749
100% Teca (ARCHANGELO, 2019)	12%	PUR	0,852

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Conforme pode ser observado na Tabela 51, os valores de densidade efetiva calculados foram inferiores àqueles encontrados nas literaturas de Celestino (2020), Dias (2020) e Archangelo (2019), sendo os respectivos valores de 0,750, 0,749 e 0,852 g/cm³; na última literatura, inclusive, foram utilizados parâmetros para se calcular painéis de alta densidade. As densidades iniciais adotadas nas respectivas literaturas foram de 0,750, 0,750 e 0,850 g/cm³ que, apesar de possuírem baixa pressão de prensagem (1,9MPa, 1,8MPa e 1,95MPa), em sua metodologia, possuíam um limitador metálico de espessura para controlar a densidade final do painel, mostrando, assim, pouca variação da densidade proposta. A diferença entre a densidade efetiva das duas propostas trabalhadas foi de 0,045 g/cm³, a segunda menor entre as espécies.

4.4.2.2 Propriedades físicas

Os resultados dos ensaios de I24h, AA24h e T.U. se encontram na Tabela 52 apresentada abaixo. Não foi levado em conta como parâmetro o adesivo utilizado, pois todos os materiais utilizaram o mesmo adesivo:

Tabela 52 - Resultados dos ensaios físicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Teca comparados com as literaturas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	I 24H (%)	AA 24H (%)	T.U. (%)
T_{HO} (Autor)	10%	PUR	11,74^A (53,14) *	46,18^A (16,12) *	4,52^B (8,05) *
T_{HE} (Autor)	12%	PUR	8,67^B (19,03) *	38,41^B (10,29) *	6,13^A (4,68) *
100% Teca (CELESTINO, 2020)	10%	PUR	2,61	18,22	9,47
100% Teca (DIAS, 2020)	12%	PUR	13,78	63,75	6,40
100% Teca (ARCHANGELO, 2019)	12%	PUR	5,89	16,45	5,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

(*) Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Conforme pode ser visto na Tabela 52, assim como ocorrido com as espécies de Eucalipto e Pinus, houve uma redução significativa nas propriedades físicas em relação ao Inchamento e à Absorção em água 24 horas. Para o I24h, a redução entre o primeiro tratamento (11,74%) em relação ao segundo (8,67%) foi de 26,15%, sendo ambos os menores valores para inchamento quando comparados com as outras espécies estudadas no presente trabalho.

Para a AA24h, a redução foi de cerca de 16,82% do painel T_{HE} (38,42%) em relação ao T_{HO} (46,19%), aumentando 2% de adesivo e alterando a composição particular do painel, de forma que não ocorreu uma diferenciação estatística significativa. Em relação ao T.U., houve um aumento de 35,54% dos painéis homogêneos (4,53%) em relação aos heterogêneos (6,14%), conforme ocorrido com as três espécies já mencionadas em subitens anteriores.

Em comparação com a literatura (CELESTINO, 2020; DIAS, 2020; ARCHANGELO, 2019), mesmo possuindo um valor baixo de I24h, os resultados calculados para T_{HO} e T_{HE} ficaram abaixo apenas do valor encontrado por Dias (2020), de 13,78% utilizando 12% de adesivo em relação ao peso seco, enquanto os outros valores encontrados por Celestino (2020) e Archangelo (2019), sendo 2,61% e 5,89%, se mostraram muito abaixo do esperado para os painéis com Teca, mesmo o material possuindo uma resistência à água superior a demais espécies.

A mesma análise se aplica para a AA24h. Os resultados calculados para ambas as hipóteses ficaram abaixo do valor encontrado por Dias (2020) de 63,75%, enquanto as literaturas de Celestino (2020) e Archangelo (2019) chegaram aos valores de cerca de 18,22 e 16,45%, respectivamente.

Para o Teor de Umidade, o resultado encontrado para T_{HO} , de 4,53%, foi o menor valor em comparação às literaturas citadas anteriormente, com valores para Celestino (2020), Dias (2020) e Archangelo (2019) de 9,47, 6,40 e 5,23%, respectivamente, enquanto que, para T_{HE} , o único valor inferior ao calculado foi o da última literatura supracitada.

4.4.2.3 Propriedades mecânicas

Na Tabela 53 abaixo podem ser vistos os valores obtidos para Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE) e Tração Perpendicular (TP) referentes à espécie *Tectona grandis*:

Tabela 53 - Resultado dos ensaios mecânicos dos painéis homogêneos e heterogêneos de Teca em comparação com as literaturas propostas

Nomenclatura	Teor de Adesivo	Adesivo	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)
T_{HO} (Autor)	10%	PUR	9,72 ^B (14,26) *	1.751 ^B (7,24) *	0,46 ^B (26,32) *
T_{HE} (Autor)	12%	PUR	11,92 ^A (13,85) *	2.141 ^A (8,40) *	0,73 ^A (20,77) *
100% Teca (CELESTINO, 2020)	10%	PUR	12,51	1.996	2,27
100% Teca (DIAS, 2020)	12%	PUR	10,62	2.405	1,77
100% Teca (ARCHANGELO, 2019)	12%	PUR	14,26	2.040	2,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

()* Coeficiente de variação referente à amostragem utilizada e resultados do agrupamento pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Letras iguais implicam em médias estatisticamente equivalentes e, sendo diferentes, A é maior do que B.

Em comparativo com as duas metodologias propostas, houve um aumento significativo em todas as propriedades mecânicas da Teca. Com o aumento do teor de adesivo e o rearranjo das partículas, o MOR aumentou 22,61% quando comparado o segundo tratamento (11,93 MPa) com o primeiro (9,73 MPa); o MOE também aumentou em uma proporção semelhante, sendo de 22,20% entre os dois tratamentos trabalhados, 2.141 MPa para os painéis heterogêneos e 1.752 MPa para os painéis homogêneos.

O aumento estatístico mais significativo ocorreu na T.P., na qual o comparativo entre o primeiro tratamento, que confeccionou os painéis homogêneos (0,46 MPa), em função do segundo, de painéis heterogêneos (0,73 MPa), mostrou um aumento de 58,70%, comumente encontrado nas espécies de Eucalipto e Pinus.

Para a confecção dos painéis homogêneos, todos os resultados dos ensaios mecânicos para MOR, MOE e T.P (9,73; 1.752 e 0,46 MPa) foram inferiores quando comparados com Celestino (2020), Dias (2020) e Archangelo (2019), que obtiveram valores de MOR (12,51; 10,62 e 14,26 MPa), MOE (1.996; 2.045 e 2.040 MPa) e T.P (2,27; 1,77a e 2,78 MPa), respectivamente.

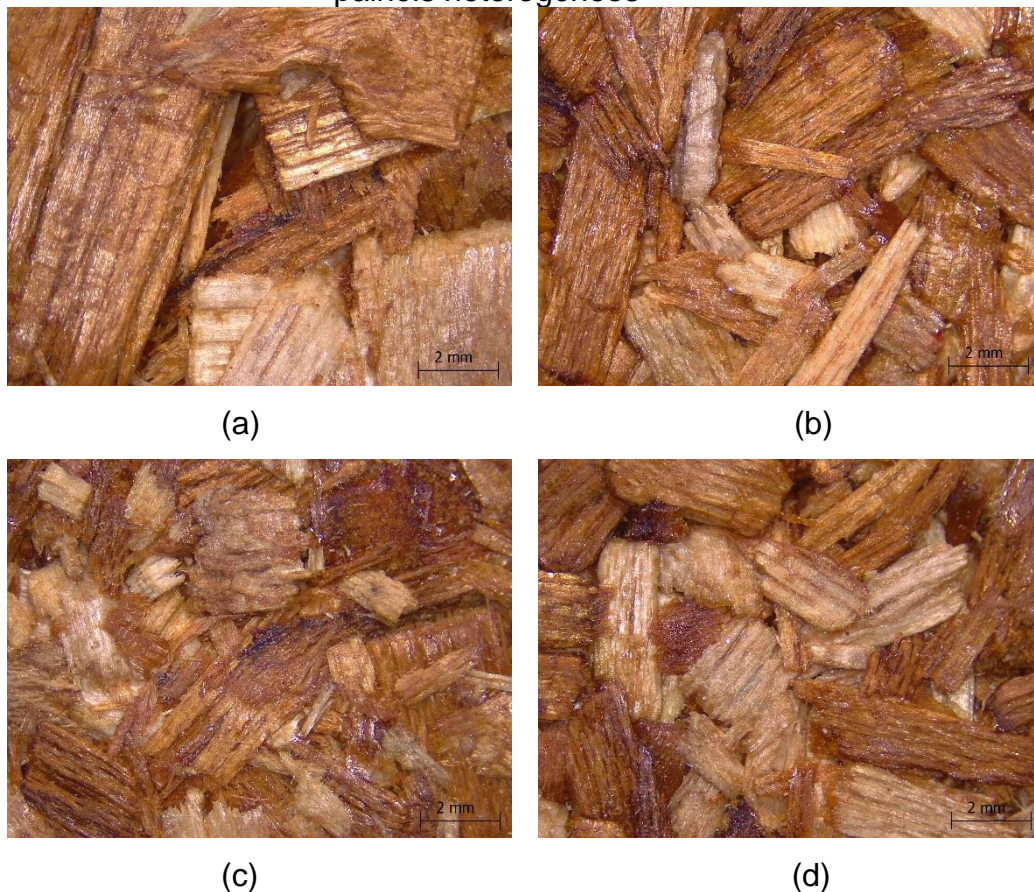
Os painéis heterogêneos apresentaram resultados melhores quando comparados com a literatura. Em relação ao MOR (11,93 MPa), o valor calculado foi superior ao encontrado por Dias (2020), enquanto o MOE (2.141 MPa) encontrado foi superior aos resultados das três literaturas propostas, e a T.P (0,73 MPa), mesmo sendo maior em relação ao T_{HO}, também obteve valores inferiores aos encontrados nas respectivas literaturas, podendo ser consultados os valores na Tabela 53.

4.4.3 Imagem aumentada por lupa com câmera acoplada

Semelhantemente ao ocorrido com as três espécies anteriores, realizou-se a análise dos painéis homogêneos e heterogêneos confeccionados com Teca, com o objetivo de entender o comportamento do material em relação às

duas hipóteses propostas, como pode ser observado pelas Figuras 38 e 39 a seguir, com a imagem aumentada 8 vezes.

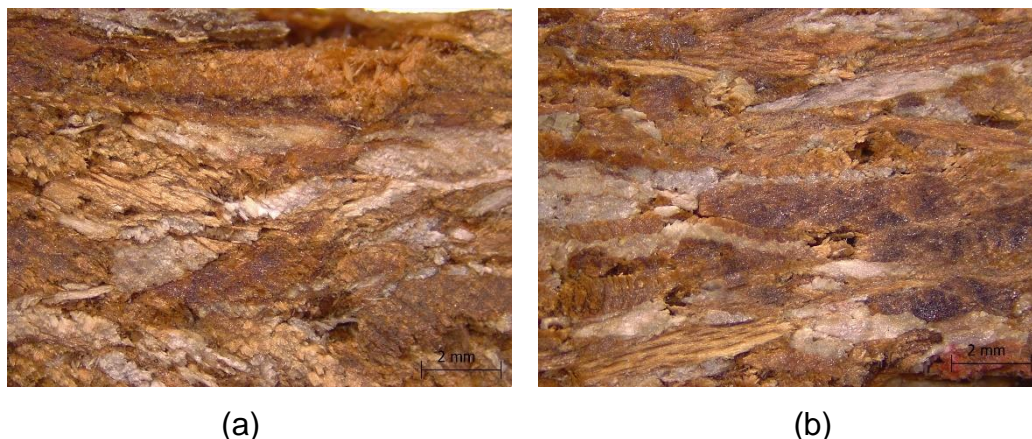
Figura 38 - Detalhes dos corpos de prova de Teca, da esquerda para direita: (a) face superior dos painéis homogêneos, (b) face superior dos painéis heterogêneos, (c) face inferior dos painéis homogêneos e (d) face inferior dos painéis heterogêneos



Fonte: acervo do autor.

Conforme ocorrido com os painéis homogêneos de Eucalipto, os painéis homogêneos produzidos com Teca tiveram espaços vazios em sua produção, mesmo com sua dispersão granulométrica sendo semelhante à da Seringueira, conforme pode ser visto no detalhe (a), enquanto o detalhe (b) mostra um maior agrupamento das partículas dos painéis heterogêneos. Assim também é possível observar pelo detalhe (c) o agrupamento desordenado das partículas menores do painel homogêneo em decorrência da queda das partículas, diferente do detalhe (d) apresentado na Figura 38 anteriormente.

Figura 39 - Detalhes da seção transversal dos corpos de prova de Teca, da esquerda para direita: (a) perfil do painel homogêneo, (b) perfil do painel heterogêneo



Fonte: acervo do autor.

O desagrupamento das partículas também é possível de ser visualizado na Figura 39, pelo detalhe (a) em comparação com o detalhe (b), que mostram, respectivamente, a parte lateral do painel homogêneo e do painel heterogêneo. No detalhe (a) ainda é possível observar partes do corpo de prova que não estão totalmente consolidadas e compactadas, sendo visível no detalhe (b) que, assim como as outras espécies, não mostra a divisão das camadas do painel, sendo que, em ambos os casos, também se observa a presença de espaços vazios no perfil lateral, sendo necessário reorganizar a estrutura do painel utilizado por essa espécie ou adicionar alguma material mais elástico, com o intuito de aumentar as propriedades mecânicas do painel.

Conforme ocorrido com Eucalipto e Pinus, e de acordo com os estudos de Gava *et al.* (2015) e Bueno (2015), pode-se concluir que a reestruturação das partículas na mudança entre os tratamentos propostos para a espécie de Teca melhorou as propriedades mecânicas e físicas dos painéis.

4.5 Classificação de acordo com a NBR 14810-2 (ABNT, 2018)

Os parâmetros utilizados para a classificação dos painéis estão de acordo com a NBR 14810 parte 2, mostrada na Tabela 54, utilizada para painéis de média densidade:

Tabela 54 - Valores mínimos exigidos por norma para classificação dos painéis aglomerados de média densidade

NBR 14810-2 (ABNT, 2013)				
Classificação	I 24 (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T. P (MPa)
P2	22	11	1.800	0,40
P4	16	16	2.300	0,40

Fonte: Adaptado da NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Com os valores parametrizados, foi realizado um resumo final contendo os principais resultados das oito propostas trabalhadas com suas respectivas classificações, conforme explicita a Tabela 55 a seguir:

Tabela 55 - Resumo das principais propriedades e classificação dos painéis

Nomenclatura	I 24h (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	T.P (MPa)	Classificação final
E _{HO}	19,69	6,92	1.433	0,36	S/C*
P _{HO}	22,61	8,45	1.673	0,42	S/C*
S_{HO}	15,86	12,47	2.233	0,92	P2
T _{HO}	11,74	9,73	1.752	0,42	S/C*
E_{HE}	14,39	17,92	2.324	0,81	P4
P_{HE}	20,80	11,22	1.831	0,68	P2
S _{HE}	23,00	8,54	1.590	0,84	S/C*
T_{HE}	8,67	11,93	2.141	0,73	P2

Fonte: Acervo do autor.

* Sem classificação

Os painéis que não passaram nas exigências mínimas em algum dos itens mostrados acima ficaram sem classificação, sendo necessária a utilização de outras normas para classificá-los. Com a proposta trabalhada no primeiro tratamento, o único painel que pode ter sido classificado é o S_{HO}, sendo um painel do tipo P2 – painéis não estruturais para uso interno em condições secas –, enquanto que, no segundo tratamento, os painéis P_{HE} e T_{HE} se classificaram também como P2, sendo apenas a proposta E_{HE} classificada como P4 – painéis estruturais para uso em condições secas.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises normativas utilizadas, pode-se concluir que a melhor espécie para o primeiro tratamento apresentado – que se constituiu no uso do resíduo em sua forma integral para a produção de painéis homogêneos – foi a Seringueira processada com umidade saturada, uma vez que a espécie obteve os pré-requisitos mínimos para ser classificada de acordo com a NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Para o segundo tratamento – no qual foi usada a metodologia de produção de painéis heterogêneos e foi colocado o resíduo no interior do painel –, concluiu-se que a espécie que apresentou o melhor desempenho foi o Eucalipto, devido à reconfiguração das partículas, que resultou em melhoria significativa dos painéis.

Por meio da análise estatística e da literatura de base (IWAKIRI *et al.*, 2012; BUENO 2015; GAVA *et al.*, 2015), foi possível concluir que a reconfiguração do painel de apenas uma camada para três camadas melhorou as propriedades mecânicas (MOR, MOE e TP) e algumas propriedades físicas (Inchamento 24h e Absorção 24h) dos painéis fabricados com três das quatro espécies estudadas. Para a Seringueira, não houve um parâmetro ideal de análise, pois os dois materiais utilizados foram produzidos com umidades distintas.

Além disso, o aumento do teor de adesivo de 10% para 12% contribuiu principalmente para as propriedades físicas dos painéis (I24h e AA24h), sendo que também os painéis fabricados com três das quatro espécies apresentaram melhorias, se comparados os dois tratamentos. Quando analisadas as literaturas base supracitadas, foi possível concluir que o aumento de 2% de resina em relação à mudança do painel se torna desprezível para as análises dos ensaios mecânicos, já que, em outras literaturas, os autores usam cerca de 18 a 30% de adesivo somados os valores usados nas camadas internas e externas.

Outra conclusão pertinente diz respeito à umidade de processamento, a qual influencia, de forma significativa, na geometria e também nas propriedades finais dos painéis, como ocorrido com a Seringueira. Portanto, torna-se necessário um maior controle da produção das partículas, como

também da umidade, na hora do processamento da madeira, evitando, assim, eventuais problemas para se comparar as análises dos resultados.

O tratamento que obteve os melhores resultados foi o que se utilizou da metodologia de produção de painéis heterogêneos de três camadas, pois a elevada dispersão granulométrica impossibilitou uma distribuição uniforme das partículas de madeira ao longo do volume do painel. Dessa maneira, é possível utilizar a madeira como resíduo de processamento, desde que haja uma separação com camadas de partículas de dimensões menores que possibilitem a distribuição de cargas uniformes no momento da prensagem dos painéis.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de outras configurações de painéis heterogêneos na estrutura da camada externo/interno/externo, podendo ser 30/70/30, 20/80/20 e 10/90/10. Outra proposta também é limitar e variar as dimensões das partículas, utilizando partículas mais finas nas faces do painel, além também de realizar um estudo para variar o teor de adesivo nas camadas e o correlacionar com as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

REFERÊNCIAS

- ABDUL KHALIL, H. P. S. *et al.* Development and material properties of new hybrid medium density fibreboard from empty fruit bunch and rubberwood. **Materials & Design**, Amsterdam, v. 31, n. 9, p.4229-4236, 2010.
- ACHYUTHAN, K. E. *et al.* Supramolecular self-assembled chaos: polyphenolic lignin's barrier to cost-effective lignocellulosic biofuels. **Molecules**, Basel, v. 15, p. 8641–8688, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules15118641>
- ALBUQUERQUE, C. E. C de. **Interações de Variáveis no Ciclo de Prensagem de Aglomerados**. 2002. 175 p. Tese (Doutorado) - Centro de ciências florestais e de madeira, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado) – Tecnologia de Produtos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiza de Queiróz, Universidade Estadual de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ANJOS E SILVA, S. G. *et al.* **A cultura da Mamona na região de clima temperado: informações preliminares**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, p. 6-23, 2005.
- ARABI, M. *et al.* Interaction analysis between slenderness ratio and resin content on mechanical properties of particleboard. **Journal of Forestry Research**, Harbin, v. 22, p. 461–464, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-011-0188-2>.
- ARAÚJO, C. K. C. *et al.* Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 15, n. 1, p. 197-211, 2019.
- ARAÚJO, L. C. R. **Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos**. 1992. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- ARCHANGELO, A. **Fabricação e caracterização dos painéis homogêneos com partículas de madeira teca (*Tectona grandis* L. f.) e a adição da casca de Arroz**. 2019. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9939**: Agregados: determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14810-1**: Painéis de partículas de média densidade: parte 1: terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTA PLANTADA - ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012** / ABRAF. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3910>. Acesso em 21 dez. 2021.

AYRILMIS, N. *et al.* Utilization of pine (*Pinus pinea* L.) cone in manufacture of wood-based composite. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 1, p. 65–70, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.043>.

BIANCHE, J. J. *et al.* Propriedades de painéis aglomerados fabricados com partículas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), paricá (*schizolobium amazonicum*) e vassoura (*sida spp.*). **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 623-630, out./dez. 2012.

BISPO, R. A. **Produção e avaliação de painéis de partículas de fibra de coco, pinus e eucalipto aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2021.

BRANDSHAW, C. J. L. *et al.* Underestimating the Challenges of Avoiding a Ghastly Future. **Frontiers in Conservation Science**, Lausanne, v. 1, p. 1-10, 2021.

BRITO, F. M. S. *et al.* Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles. **Construction and building materials**, London, v. 262, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120501>.

BUZO, A. L. S. C. *et al.* Painéis de pinus e bagaço de cana empregando-se dois adesivos para uso na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 183-193, out./dez. 2019.

BUZO, A. L. S. C. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de pinus e bagaço de cana empregando-se ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2018.

CABRAL, M. R. *et al.* Painéis de partículas com maravalha de Pinus spp. e fibra de sisal. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 353-362, jun. 2017. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.11

CARDOSO, N. S. **Caracterização da estrutura anatômica da madeira, fenologia e relações com atividade cambial de árvores de Teca (*Tectona grandis* L.f.) – Verbenaceae**. 1991. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1991.

CASSILHA, A. C. *et al.* Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental. **Revista Educação & Tecnologia**, Curitiba, n. 8, p. 209-228, 2004.

CELESTINO, V. R. B. **Estudo do comportamento físico e mecânico de painéis aglomerados fabricados com partículas de *Tectona grandis* e *Corymbia citriodora***. 2020. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, SP, 2020.

CERQUEIRA, P. H. A. de *et al.* Análise dos resíduos madeireiros gerados pelas serrarias do município de Eunápolis-BA. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 506-510, 2012. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.4322/loram.2012.051.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Produção de chapas de partículas com resíduos de madeira *Cordia goeldiana*. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, p. 368-377, 2015.

CORADIN, V. T. R. *et al.* **Madeiras comerciais do Brasil**: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. [S. l.: s. n.], 2010.

COSTA, K. L. **Crescimento de *Tectona grandis* (Teca) em sistema silvicultural talhadia composta em Minas Gerais**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

COUTINHO, F. M. B.; DELPECH, M. C. Poliuretanos como materiais de revestimento de superfície. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 9, p. 41-48, jan./mar. 1999.

DIAS, L. G. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos painéis de Teca com adição de Pupunha**. 2020. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Espécies de Pinus mais plantadas no Brasil**. Brasília, DF, 2014. Disponível em:

https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaold=3715&p_r_p_996514994_topicold=3229. Acesso em 21 dez. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Eucalipto: perguntas e respostas**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>. Acesso em 21 dez. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Pinus: perguntas e respostas**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em 21 dez. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Seringueira**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agrossilvipastoril/sitio-tecnologico/trilha-ecologica/especies/seringueira>. Acesso em: 21 dez. 2021.

ESPÓSITO, S. S. **O uso da madeira na arquitetura: séculos XX e XXI**. 2007. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, SP, 2007.

EUFRADE JUNIOR, H. J. *et al.* Potential of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) for structural use after the period of latex extraction: a case study in Brazil. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 61, p. 384–390, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1478-7>.

FAO, ITTO and United Nations. **Forest product conversion factors**. Rome, Italy: FAO, ITTO and United Nation, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca7952en>.

FARIA, D. L. *et al.* Emprego de maravalhas de Eucalyptus na produção de painéis: uma alternativa para aproveitamento dos resíduos oriundos da usinagem da madeira. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 7, n. 3, p. 1101-1109, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v7i3.9895>.

FARIA D. L., *et al.* Particleboards produced with different proportions of Hevea brasiliensis: Residual wood valorization in higher value added products.

Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 45, 2021, s/p. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145021420>.

FERREIRA, C. A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na região de Mogi Guaçu (SP). **IPEF**, Brasília, DF, v. 18, p. 106-117, 1979.

FERREIRA, M. **Melhoramento genético do *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake direcionado para formação das populações base tipo casca lisa (“gum”)**. Piracicaba: ESALQ/USP/Departamento de Ciências Florestais, 1997.

FIGUEIREDO, E. O.; SÁ, C. P. de. **Silvicultura e Manejo de Povoamentos de Teca (*Tectona grandis* L.f.)**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2015. p. 9-44.

FINGER, F. A.; FINGER, Z.; BARROS, N. Qualificação da madeira de teca, *Tectona grandis* L.f., oriunda do primeiro desbaste comercial, com vistas a seu aproveitamento. **Madeira: arquitetura e engenharia**. São Paulo, v. 4, n. 12, jan./abr. 2004.

FINOTTI, A. R., *et al.* Uso energético de resíduos de madeira na cadeia produtiva de madeira/móveis e possibilidades de geração de créditos de carbono. *In*: Schneider, V. E., Nehme, M. C., Ben. F. (org.). **Pólo Moveleiro da Serra Gaúcha - Sistemas de gerenciamento ambiental na indústria moveleira**. Educs, 2006. p. 191-230.

FIORELLI, J. *et al.* Painéis de partículas monocamadas fabricadas com resíduo de madeira e fibra de verde. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 43, p. 175-182, 2015.

FIORELLI, J. *et al.* Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. **Industrial Crops And Products**. Amsterdam, v. 40, p. 69-75, 2012.

FLORÉZ, J. B. **Caracterização tecnológica da madeira jovem de Teca (*Tectona grandis* L.f.)**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

FONTES, P. J. P. **Auto-Suficiência Energética em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos**. 1994. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO Forestry Department. **Global forest products (facts and figures)**. Rome, Italy: FAO, 2016. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/card/en/c/I7034EN/>. Acesso em: 21 dez. 2021.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463p (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113).

FRANCIS, J. K. ***Pinus caribaea* morelet. Caribbean pine**. New Orleans: Departamento de Agricultura, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 1992. 10 p.

GAVA, M. *et al.* Production of particleboards from *hevea brasiliensis* clones and castor oil-based polyurethane resin. **Bioresources**, Raleigh, v. 10, n. 4, p. 6896- 6905, 2015.

GARCIA R. A.; MARINONIO, G. B. Variação da cor da madeira de Teca em função da densidade e do teor de extrativos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 1, p. 124-134, 2016.

GILIO, C. G. **Avaliação de painéis de partículas homogêneas empregando-se madeira de *Hevea brasiliensis* e *Tectona grandis*, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2020.

GILIO, C. G. *et al.* Produção de painéis aglomerados empregando seringueira, teca e poliuretano derivado de óleo de mamona. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, Brasília, DF, n. 57, p. 86-97, dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/5825>. Acesso em 21 Dez. 2021. DOI: [doi:http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5825](http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5825)

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK – GFN. **Open Data Platform**. [S. l.: s. l.], 2017. Disponível em: https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.208377622.503310936.1636407153-2014831194.1636407153#/. Acesso em: 21 dez. 2021.

GOMES J. I; SAMPAIO S. S. **Aproveitamento de resíduos de Madeira em Três Empresas Madeireiras do Estado do Pará**. Belém: Embrapa, 2004. (Comunicado técnico, n. 102).

GONÇALVES, F. G. *et al.* Densitometria de raios x na avaliação da densidade em painéis de partículas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p.1151-1162, 2018.

GONÇALVES, P. S. **Sub-produtos complementares da renda de um seringal**. Campinas, 2002. Disponível em: <http://www.apabor.org.br/sitio/artigos/html/20020808-1.htm#1>. Acesso em: 21 dez. 2021.

GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. **Painéis de madeira de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

HSING, T. Y.; PAULA, N. F. de.; PAULA, R. C. de. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Floresta**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório anual**. Brasília, 2020. Relatório.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS – IAC. **Centro de Seringueira e Sistemas Agroflorestais**. Campinas, 2012. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/seringueira/importancia.php>. Acesso em: 21 dez. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras**: Teca. São Paulo, 2021. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/78.htm. Acesso em: 21 dez. 2021.
IWAKIRI, S. História: características tecnológicas e aplicações, **Revista da Madeira**. Paraná, n. 71, 2003. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=328. Acesso em: 21 dez. 2021.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2005.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de painéis aglomerados de *Hevea brasiliensis* (Clone RRIM 600) em mistura com três espécies de *Eucalyptus* utilizadas pelas indústrias de São Paulo. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 46, n. 117, p. 31-39, mar. 2018. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n117.03](https://doi.org/10.18671/scifor.v46n117.03).

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de painéis aglomerados homogêneos e multicamadas de *Melia azedarach* (Cinamomo) e *Pinus taeda* com diferentes teores de resina. **Cerne**. Lavras, v. 18, n. 3, p. 465-470, jul./set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000300014>

IWAKIRI, S. *et al.* Use of residues of forestry exploraion of *Pinus taeda* for particleboardmanufacture. **Revista Árvore**, v. 41, p. 1-8, 2017.

IWAKIRI, S. *et al.* Use of wood from *Pinus caribaea* var. *Caribaea* and *Pinus caribaea* var. *Bahamensis* for production of particleboard panels. **Cerne**. Lavras, v. 16, n. 2, p. 193-198, abr./jun. 2010.

IWAKIRI, S. *et al.* Utilização de resíduos de exploração florestal de *Pinus taeda* para produção de painéis aglomerados. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 41, n. 3, p. 1-8, 2017.

JAGGER, R. W. **The new pallmann ring refiner, type PF, for green sawdust, shavings, and other such materials.** *In:* International Particleboard Composite materials Symposium, 26th Proceedings, Washington State University, 1992. p. 94-105.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC).** 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2000.

JULIANA, A. H.; PARIDAH, M. T.; ANWAR, U. M. K. Properties of three-layer particleboards made from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) and rubberwood (*Hevea brasiliensis*). **Materials & Design**. London, v. 40, p. 59-63, 2012.

KLÍMEK, P. *et al.* Using sunflower (*Helianthus annuus* L.), topinambour (*Helianthus tuberosus* L.) and cup-plant (*Silphium perfoliatum* L.) stalks as alternative raw materials for particleboards. **Industrial crops and products**, v. 92, p. 157-164, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.004>

LEONELLO, E. C. **Avaliação das propriedades físico-mecânicas da madeira de árvores de *Hevea brasiliensis* em três condições de sanidade no estado de São Paulo.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

LIM S. C.; GAN K. S.; CHOO K. T. The characteristics, properties and uses of plantation timbers – rubberwood and Acacia mangium. **Timber Technology Centre (TTO)**, Kepong, v. 26, p. 1–11, 2003.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing.** San Francisco: M. Freeman, p. 672-689, 1993.

MENDES, R. F. *et al.* Qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, 2014.

MINILLO, L. Q. **Aproveitamento de resíduo das indústrias de celulose e sucroalcoleira para produção de painéis aglomerados.** 2016. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2016.

MIYAMOTO, K.; NAKAHARA, S.; SUZUKI, S. Effect of particle shape on linear expansion of particleboard. **Journal of Wood Science**, Tokyo, p. 185–190, 2002.

- MÖLLEKEN, R. E. **Aplicação do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona na obtenção de painéis de madeira colados lateralmente**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto do Brasil**. São Paulo: SBS, 2000. 112 p.
- MOSLEMI, A. A. **Particleboard**: materials. London: Southern University Press, v.1, 1974, 244p.
- MOTTA, J. P. *et al.* Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.8, p. 1393-1398, ago. 2013.
- MOURA, V. P. G. **O germoplasma de Eucalyptus urophylla S. T. Blake no Brasil**. Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. 2004, p. 12. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Comunicado Técnico 111).
- MUZEL, S. D. *et al.* Mdp panels manufactured with hevea brasiliensis overlaid with bamboo foil of phyllostachys edulis. **Advanced Materials Research**. Amsterdam, v. 1088, p. 686-689, 2015.
- NASCIMENTO, M. F. do; LAHR, F. A. R; CHRISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de média densidade (MDP):** Fabricação e caracterização. São Carlos: EESC, p. 1-45, 2015.
- NASCIMENTO, M. F. *et al.* Painéis de partículas homogêneas fabricados com resíduos lignocelulósicos e resina alternativa para aplicação em pisos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, p. 1-6, 2016.
- NOURBAKHS, A., BAGHLANI, F.F., ASHORI, A. Nano-SiO₂ filled rice husk/polypropylene composites: physico-mechanical properties. **Ind. Crops Prod.** v. 33, p. 183–187, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.010>.
- OLIVEIRA JUNIOR, E. F. **Determinação das propriedades físicas e químicas da madeira de Hevea brasiliensis em relação ao painel de extração de látex**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.
- OLIVEIRA, R. C. **Produção e avaliação de painéis de partículas de eucalipto e couro com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2019.

PAES, J. B. *et al.* Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectonagrandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias – Brazilian Journal Of Agricultural Sciences**, Recife, v. 10, n. 3, p. 437- 442, 2015.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. dos. **Programa de melhoramento genético de eucalipto da Embrapa Florestas: resultados e perspectivas**. 1 ed. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2011. 64 p.

PEREIRA, S. S. C. **Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga**. 2009. Tese de mestrado integrado. Engenharia Civil (Especialização em Construções Civas) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/59599>. Acesso em 9 de mar. 2022.

PIERRE, F. C.; BALLARIN, A. W.; PALMA, H. L. Caracterização física de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis* com adição de resíduos industriais madeireiros. **Cerne**. UFLA - Universidade Federal de Lavras, v. 20, n. 2, p. 321-328, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760.201420021289>.

PIMENTEL, M. M. *et al.* Variações das propriedades da madeira de *Tectona grandis* Linn. F. (teca) em função do espaçamento e da posição radial na tora. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INSTITUTO FLORESTAL*, 2., 2008. **Anais [...]** São Paulo: Instituto Florestal, v. 39, p. 9-24 (Série Registros).

PINHEIRO, R. V. **Emprego da madeira do gênero Pinus na construção de estruturas de cobertura**. 1996. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

PIRAYESH, H., KHAZAEIAN, A. Using almond (*Prunus amygdalus L.*) shell as a bio-waste resource in wood-based composite. **Compos. Part B Eng.** v. 43, p. 1475–1479, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.008>.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcel Dekker. 1994, 297 p.

RAVEN, P.; WACKERNAGE, M. Maintaining biodiversity will define our long-term success. **Plant Diversity**. China, v. 42, n. 4, p. 211-220, 2020.

RAZERA, D. L. **Estudo Sobre as Interações entre as Variáveis do Processo de Produção de Painéis Aglomerados e Produtos Moldados de Madeira**. 2006. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

RIBEIRO, F. A.; FILHO, J. Z. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus spp.* **IPEF**, Brasília, DF, v. 46, p. 76-85, 1993.

ROCHA, B. B. **Aproveitamento de resíduos de madeira e bagaço de cana-de-açúcar na produção e avaliação de painéis aglomerados**. 2016.

Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2016.

SANCHES, A. O. **Influência de nanocristais de celulose nas propriedades térmicas, dielétricas e piezoelétricas em compósitos elastoméricos a base de poliuretano**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais com ênfase em Física da Matéria Condensada) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

SANTOS, J. A. **Estudos de Modelos e Caracterização do Comportamento Mecânico da Madeira**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, 2007. 273p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.9/357>. Acesso em 09 de mar. 2022.

SAM-BREW, S.; SMITH, G. D. Flax shive and hemp hurd residues as alternative raw material for particleboard production. **Bioresources**, Raleigh, v. 12, n. 3, p. 5715-5735, 2017.

SILVA JÚNIOR, F. G. Utilização múltipla da madeira de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* para produção de celulose kraft. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.9, n.27, p. 56-62, ago. 1993.

SILVA, G. C. **Qualidade de painéis aglomerados produzidos com adesivos à base de lignosulfato e ureia-formaldeído**. 2015. Tese (Doutorado) – Curso de Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas – UFRRJ, Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, J. M. da *et al.* Divergência genética entre progênies de *Pinus caribaea* var. *caribaea* com base em caracteres quantitativos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 69, 2012. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/194>. Acesso em 27 de mar. 2022.

SILVA, V. U. da. **Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na produção de painéis de partículas**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SILVA, V. U. *et al.* Circular vs. linear economy of building materials: a case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. conventional particleboards. **Construction and building materials**, Amsterdam, v. 285, p. 1-17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 2, p. 179-184, 2013. DOI: 10.1590/S0044-59672013000200007

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF. **Site**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/cadeia-produtiva>. Acesso em: 21 dez. 2021.

SOUZA, M. *et al.* **Painéis aglomerados homogêneos de madeira produzidos com pinus, palha de milho, polietileno tereftalato e poliuretano derivado de óleo de mamona**. Porto Alegre: Atena, 2021. p. 319-326. DOI: 10.22533/at.ed.81921081142.

SOUZA, R. S. **Propriedades tecnológicas de *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos**. 2019. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

SUGAHARA, E. S. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2018.

TREVISAN, C. G. **Painéis aglomerados homogêneos produzidos com partículas de pinus e seringueira e aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona – avaliação das propriedades físicas e mecânicas**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2021.

TRIANOSKI, R. *et al.* Avaliação das propriedades de painéis compensados de *Melia azedarach* L. produzidos com diferentes gramaturas e tempos de prensagem. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 4, p. 759-768, 2015.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

VALE, A. T.; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A. N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília - DF. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.

VISNARDI, O. C. *et al.* Produção e Avaliação Física de Chapas de Partículas de Bambu da Espécie *Dendrocalamus giganteus*. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 12., Lavras. **Anais [...]** [S. l.]: EMBRAMEM, 2010.

WANG, H.; MALCOLM, D. C.; FLETCHER, A. M. *Pinus caribaea* in China: introduction, genetic resources and future prospects. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 117, n. 1-3, p. 1-15, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00479-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00479-4).

WECHSLER, A. *et al.* Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Rícinos communis*) oil based sustainable particleboard: a comparison of its properties with conventional wood-based particleboard. **Materials & Design**, London, v. 50, p.117-123, 2013.

ZAMARIAN, E. H. C. **Avaliação da Qualidade de Painéis Aglomerados Produzidos com Partículas Geradas a partir de Descartes de Móveis.** Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.