

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

CAROLINE GRAMINHA GILIO

**AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS HOMOGÊNEAS EMPREGANDO-
SE MADEIRA DE HEVEA BRASILIENSIS E TECTONA GRANDIS, AGLUTINADAS
COM ADESIVO POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA**

Ilha Solteira
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAROLINE GRAMINHA GILIO

**AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS HOMOGÊNEAS
EMPREGANDO-SE MADEIRA DE HEVEA BRASILIENSIS E TECTONA
GRANDIS, AGLUTINADAS COM ADESIVO POLIURETANO
DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA**

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

Prof. Dr. Sergio Augusto Mello da Silva
Orientador

Prof. Dr. Alex Otávio Sanches
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G474a Gilio, Caroline Graminha.
Avaliação de painéis de partículas homogêneas empregando-se madeira de *Hevea brasiliensis* e *Tectona grandis*, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona / Caroline Graminha Gilio. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
139 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2020

Orientador: Sergio Augusto Mello da Silva
Coorientador: Alex Otávio Sanches
Inclui bibliografia

1. Painéis de partículas homogêneas. 2. Seringueira. 3. Teca. 4. Poliuretano.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Produção e avaliação de Painéis de partículas de média densidade empregando-se madeira de Hevea brasiliensis e Tectona grandis, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona

AUTORA: CAROLINE GRAMINHA GILIO

ORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

COORIENTADOR: ALEX OTÁVIO SANCHES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

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

Prof^ª. Dr^ª. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS
Departamento de Engenharia Industrial Madeireira / Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

Ilha Solteira, 18 de fevereiro de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Reni Graminha Gilio e à minha família por todo o incentivo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, por me dar forças para seguir todos os dias e ser meu companheiro em todos os meus passos.

À minha mãe Reni Graminha Gilio pelo apoio incondicional em todos os momentos, oferecendo todo o carinho, incentivo e educação.

Ao meu pai Sebastião Carlos de Gilio que me deixou como herança um exemplo de dedicação, honestidade e ética.

À minha irmã Leticia Graminha Gilio por todos os momentos difíceis que me apoiou e todas as alegrias que me proporcionou.

Aos meus sobrinhos Barbara Samara da Cruz Frangiotti e Enzo Gilio Carmona, por toda alegria, amor e carinho que me transmitem.

À toda a minha família, meus tios, avôs e minhas primas por sempre depositarem muita confiança em mim.

Ao Professor Dr. Sergio Augusto Mello da Silva, por aceitar me orientar, por toda confiança depositada, pelo suporte oferecido e todos os ensinamentos.

Ao Professor Dr. Alex Otávio Sanches, me orientar e ajudar, pela confiança depositada e todos os ensinamentos.

Aos meus amigos do mestrado, Felipe Reis Rodrigues, Eduarda Noriko Tokuda, Rodrigo Andraus Bispo, Sherington Augusto Milani Bigotto, Mariana Ferreira Trevisan, João Miguel Bega, Marcelo Bortoletto e Guilherme Augusto Nascimento Amorim, por toda ajuda, ensinamentos e companheirismo.

Ao meu namorado Lucas Descrove Franco, por todo suporte, incentivo e por me fazer uma pessoa mais forte.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, principalmente, ao Gilson Campos Correa e ao Flávio Rogério Porato, por me propiciarem todo auxílio necessário no laboratório e estarem de portas abertas para me ajudar.

Às minhas amigas Fernanda Mazzini Patricio, Daniela Daniel e Bruna Aredes Borgo, por toda ajuda e pelos momentos de companheirismo.

À Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE da Universidade Estadual Paulista pela doação da árvore de Seringueira e Teca contribuindo para realização da pesquisa.

Ao Funcionário da FEPE Alvino da Silva, por me auxiliar no preparo das partículas.

Ao Funcionário Luiz Doniseti Belezze da Marcenaria da UNESP, por todos os serviços realizados sempre com muita dedicação.

À Empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, pela doação da resina PU-Mamona que possibilitou a confecção dos painéis.

À Prefeitura Municipal de Ilha Solteira, pela doação da árvore de Teca que possibilitou a produção dos painéis e consequente realização deste trabalho.

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

Agradeço a todos que auxiliaram direta ou indiretamente a confecção deste trabalho.

RESUMO

Estudos sobre florestas plantadas para aproveitamento de madeiras em vários setores industriais tem se intensificado no mundo. A utilização dessas madeiras no Brasil, além de garantir a sustentabilidade de espécies nativas, possibilita a produção de derivados de madeiras e o amplo emprego na construção civil. A Seringueira (*Hevea brasilienses*) e Teca (*Tectona grandis*) representam duas espécies de reflorestamento cultivadas no Brasil e que serão utilizadas neste trabalho para produção de painéis de partículas homogêneas. A Seringueira é utilizada para produção de borracha natural, entretanto, precisam ser substituídas ao final do ciclo de produção (25 a 30 anos) e, as árvores improdutivas são utilizadas para geração de energia. Com relação à Teca, espécie de origem asiática, sua madeira apresenta excelentes características de resistência e durabilidade e vem sendo empregada na construção civil de modo geral e para a produção de móveis. Vale ressaltar, que tanto a Seringueira quanto a Teca, adaptadas às condições edafológicas das regiões em que são reflorestadas, apresentam rápido crescimento e poderiam ser utilizadas para produção de painéis de partículas. Entretanto, para este trabalho, será considerada a utilização dessas espécies com mais de 20 anos, buscando-se avaliar a possibilidade de aproveitamento dessas para a produção de painéis de partículas aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de mamona (PU-Mamona). Os painéis produzidos foram avaliados de acordo com NBR 14810 - 1 e 2: 2018 e documentos internacionais para verificação de suas propriedades físicas e mecânicas, bem como, utilizando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de infravermelho (FTIR). O processo para produção dos painéis se desenvolveu em duas etapas, empregando-se 10% e 5% de PU-Mamona e misturas de madeiras de acordo com os tratamentos propostos. A primeira etapa, denominada de estudos exploratórios, considerou a utilização de dez tratamentos com o objetivo de avaliar uma tendência nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis. A segunda etapa se constituiu da produção de três painéis, referente aos tratamentos que propiciaram os melhores resultados para as propriedades de densidades, teor de umidade, inchamento em espessura após 24h, módulo de resistência à flexão estática, módulo de elasticidade e a resistência à tração perpendicular. As análises de FTIR indicaram a presença de prováveis ligações de hidrogênio entre os componentes quando da mistura das madeiras com a resina. Nos estudos realizados, verificou-se que os

painéis produzidos com 10% de PU-Mamona apresentaram melhores resultados em comparação aos painéis produzidos com 5% de PU-Mamona devido ao maior recobrimento das partículas pela resina quando em maior quantidade como observado no ensaio de MEV, entretanto, a aplicação dos dois teores de resina possibilitaram boas qualidades aos painéis e classificações de uso de acordo com as exigências propostas pela NBR 14810-2:2018.

Palavras-chave: Painéis de partículas homogêneas. Seringueira. Teca. Poliuretano.

ABSTRACT

Studies on planted forests to use wood in various industrial sectors has intensified in the world. The use of these woods in Brazil, in addition to ensuring the sustainability of native species, enables the production of wood derivatives and wide employment in civil construction. The rubber tree (*Hevea brasiliensis*) and Teca (*Tectona grandis*) represent two species of reforestation cultivated in Brazil and which are used in this work for the production of particleboards. The rubber tree is used for the production of natural rubber, however, it needs to be replaced at the end of the production cycle (25 to 30 years) and, the unproductive trees are used for power generation. Regarding Teca, a species of Asian origin, its wood has excellent resources of resistance and durability and has been used in civil construction in general and for furniture production. It is worth mentioning that both Seringueira and Teca, adapted to the edaphological conditions of the regions where they are reforested, show quick growth and are used for the production of particleboards. However, for this work, the use of these species with more than 20 years will be considered, looking for the possibility of using them for the production of agglutination panels with castor oil-based polyurethane adhesive (PU-Castor). The panels produced were evaluated according to NBR 14810 - 1 and 2: 2013 and international documents to verify their physical and mechanical properties, as well as, using scanning electron microscopy (SEM) and infrared spectroscopy (FTIR) techniques. The process for producing the panels was developed in two stages, using 10% and 5% PU-Castor and mixtures according to the proposed procedures. The first stage, called exploratory studies, considers the use of ten controls in order to evaluate an estimate of the physical and mechanical properties of the panels. The second stage consisted of the production of three panels, referring to the treatments that provided the best results for the properties of densities, moisture content, swelling in thickness after 24 hours, static flexural strength module, elasticity module and perpendicular tensile strength. FTIR analyzes indicated the presence of probable hydrogen bonds between the components when mixing the wood with the resin. In the studies carried out, it was found that the panels produced with 10% PU-Castor presented better results in comparison to the panels produced with 5% PU-Castor due to the greater covering of the particles by the resin when in greater quantity as observed in the SEM test, however, the application of the two resin contents allowed

good qualities to the panels and classifications of use in accordance with the requirements proposed by NBR 14810-2: 2018.

Keywords: Homogeneous particleboards. Rubber tree. Teak. Polyurethane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da produção, importação e exportação dos painéis de madeira no Brasil (mil m ³):	25
Figura 2 - Cadeia Produtiva de painéis de madeira aglomerada.....	27
Figura 3 – Estruturas de diferentes frações de biomassa (lignocelulose, celulose, lignina e hemicelulose) antes e depois da reação.....	32
Figura 4 - Área de ocorrência natural das espécies de Hevea.....	33
Figura 5 –Plantio de árvores de Seringueira utilizada para confecção dos painéis...	48
Figura 6 –Toras e partículas de Seringueira.	49
Figura 7 – Árvore de Teca utilizada para confecção dos painéis.	49
Figura 8– Toras e Partículas de Teca.	50
Figura 9 - Componentes da resina PU-Mamona.	51
Figura 10 – Produção dos cavacos de Seringueira e Teca.....	54
Figura 11 – Utilização do moinho de facas para produção de partículas.	54
Figura 12 – Peneirador elétrico utilizado para separação das partículas em função de seus comprimentos.	55
Figura 13 –Determinação da composição granulométrica das partículas.	56
Figura 14 –Etapas do ensaio de determinação granulométrica.	57
Figura 15 –Secagem das partículas.....	57
Figura 16 - Ilustração das amostras para determinação do teor de umidade das partículas de cada um dos tratamentos.	58
Figura 17 – Adição e homogeneização da resina PU-Mamona às partículas.	61
Figura 18– Preparação do colchão de partículas.	61
Figura 19 – Prensagem do colchão de partículas pare produção dos painéis.	62
Figura 20 – Prensa hidráulica com controle de temperatura.	63
Figura 21: Painel de Partículas	63
Figura 22 – Pontos de medição no cp.....	64
Figura 23 – Determinação das dimensões dos cps.....	65
Figura 24 – Equipamentos utilizados para pesagem e secagem dos cps.....	66
Figura 25 –Ensaio de inchamento após 24h.	67
Figura 26 – Espectrofotômetro NEXUS 670.....	68
Figura 27 – Procedimento para formação das pastilhas	69
Figura 28 – Processo de fratura em nitrogênio líquido.....	70

Figura 29 – Equipamentos para realização do ensaio de MEV.....	71
Figura 30 – Desenho do cp para o ensaio de Flexão Estática com o esquema para aferição de suas dimensões.....	72
Figura 31 – Aparato para realização do ensaio de Flexão Estática.	72
Figura 32 – Limpeza dos suportes metálicos.	74
Figura 33 – Colagem dos suportes metálicos nos cps de madeira.	75
Figura 34 – Ilustração do ensaio para avaliação da Resistência à Tração Perpendicular.	75
Figura 35 – Gráfico da densidade dos painéis.	83
Figura 36 – Gráfico do teor de umidade dos painéis.....	84
Figura 37 – Gráfico do inchamento após 24h dos tratamentos.....	85
Figura 38 – Aspectos gerais do cp de seringueira antes e depois do ensaio de Inchamento.....	86
Figura 39 – Imagens de MEV do PU-Mamona puro e em compósito.	88
Figura 40 – Imagens de MEV do recobrimento das partículas.....	89
Figura 41 – Imagens de MEV da Superfície de Fratura das amostras.....	90
Figura 42 – Micrografias da interface entre poliuretano-madeira	91
Figura 43 – Espectros das madeiras puras, PU puro e das misturas.....	92
Figura 44 – Gráfico de módulo de ruptura dos painéis.....	96
Figura 45 – Gráfico do Módulo de Elasticidade dos painéis.....	99
Figura 46 – Gráfico com valores de Tração Perpendicular dos painéis.	101
Figura 47 – Ruptura do cp no ensaio de Tração Perpendicular.	103
Figura 48 – Gráfico das propriedades dos painéis da segunda fase.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da madeira de Seringueira.....	34
Tabela 2 - Resultados dos painéis obtidos por Müzel <i>et al</i> (2015).....	35
Tabela 3 - Resultados dos painéis obtidos por Iwakiri <i>et al</i> . (2018).	36
Tabela 4 - Resultados dos painéis obtidos por Gava <i>et al</i> . (2015).....	37
Tabela 5 - Resultados mecânicos obtidos por Abdul Khalil <i>et al</i> . (2010).....	37
Tabela 6 - Resultados encontrados pelos painéis avaliados por Juliana, Paridah e Anwar (2012).....	38
Tabela 7 - Resultados dos painéis obtidos por Lacombe (2015).....	41
Tabela 8 - Resultados dos painéis obtidos por Souza <i>et al</i> . (2018).	41
Tabela 9 - Resultados dos painéis obtidos por Wechsler <i>et al</i> . (2013).....	45
Tabela 10 - Resultados dos painéis de sacos de cimento obtidos por Cravo, Sartori e Fiorelli (2017).	46
Tabela 11 - Resultados dos painéis de partículas de bagaço de cana obtidos por Cravo, Sartori e Fiorelli(2017).	46
Tabela 12 - Resultados dos estudos de Fiorelli <i>et al</i> . (2012).	47
Tabela 13 – Tratamentos propostos para os painéis exploratórios.	52
Tabela 14– Teor de umidade das partículas.	77
Tabela 15 – Composição Granulométrica 100% Seringueira.....	78
Tabela 16 – Composição Granulométrica 70% Seringueira e 30% Teca.....	79
Tabela 17 – Composição Granulométrica 50% Seringueira e 50% Teca.....	80
Tabela 18 – Composição Granulométrica 30% Seringueira e 70% Teca.....	81
Tabela 19 – Composição Granulométrica 100% Teca.	81
Tabela 20 – Densidade dos painéis.	82
Tabela 21 – Teor de umidade.	84
Tabela 22 – Inchamento após 24h.....	85
Tabela 23 – Absorções de FTIR referentes as amostras puras. (Continua)	93
Tabela 24 – Valor de MOR mínimo por tipo de uso.	95
Tabela 25 – Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR).	96
Tabela 26 – Requisito mínimo de MOE por tipo de uso.	98
Tabela 27 – Módulo de elasticidade (MOE).	98
Tabela 28 – Requisito mínimo de TP por tipo de uso.....	100
Tabela 29 – Resistência à tração perpendicular dos painéis.	101

Tabela 30 – Teor de umidade (U) das partículas.	105
Tabela 31 – Densidade dos painéis.	106
Tabela 32 – Tabela de Análise de Variância das densidades dos painéis.	107
Tabela 33 – Teste Tukey para a FV Madeira.	107
Tabela 34 – Teste Tukey para a FV Resina.	107
Tabela 35 – Teor de umidade dos painéis.	108
Tabela 36 – Tabela de Análise de Variância da variável Teor de Umidade.	108
Tabela 37 – Teste Tukey para a FV Madeira.	109
Tabela 38 – Tabela de Análise de Variância do desdobramento de madeira dentro de cada nível de resina PU-Mamona.	109
Tabela 39 – Teste Tukey para a FV Madeira dentro de 5% e 10% de resina.	110
Tabela 40 – Tabela de Análise de Variância do desdobramento de resina dentro de cada nível de misturas de partículas de madeira.	110
Tabela 41 – Teste Tukey para a FV Resina dentro do tratamento com misturas de partículas de madeira com 50%Teca e 50%Seringueira.	111
Tabela 42 – Limite máximo por tipo de uso quanto ao inchamento em espessura.	111
Tabela 43 – Inchamento após 24h dos painéis.	112
Tabela 44 – Análise de Variância dos valores de Inchamento após 24 horas.	112
Tabela 45 – Teste Tukey para a FV Madeira.	113
Tabela 46 – Teste Tukey para a FV Resina.	113
Tabela 47 – Análise de Variância do desdobramento das partículas de madeira dentro de cada nível de resina PU-Mamona.	113
Tabela 48 – Teste Tukey para a FV dos tratamentos com partícula de madeira dentro de 5% e 10% de resina PU-Mamona.	114
Tabela 49 – Análise de Variância do desdobramento de resina dentro de cada nível de misturas de partículas de madeira.	114
Tabela 50– Teste Tukey para a FV Resina PU-Mamona dentro do tratamento 70%Teca e 30%Seringueira.	115
Tabela 51– Teste Tukey para a FV Resina PU-Mamona dentro do tratamento 50%Teca e 50%Seringueira.	115
Tabela 52 – Valor mínimo de MOR por tipo de uso.	116
Tabela 53 – Módulo de resistência à flexão estática (MOR) dos painéis.	116
Tabela 54 – Tabela de Análise de Variância para os valores de MOR.	117
Tabela 55 – Teste Tukey para a FV Partículas de Madeira.	117

Tabela 56 – Teste Tukey para a FV Resina PU-Mamona.....	118
Tabela 57 – Requisito mínimo de MOE por tipo de uso.....	118
Tabela 58 – Módulo de elasticidade (MOE) dos painéis.	118
Tabela 59 – Análise de Variância do MOE.....	119
Tabela 60 – Teste Tukey para a FV Resina.....	119
Tabela 61 – Requisito mínimo de TP por tipo de uso.....	120
Tabela 62 – Resistência à Tração Perpendicular dos painéis.....	120
Tabela 63 – Análise de Variância para a Resistência à Tração Perpendicular.	121
Tabela 64 – Teste Tukey para a FV Madeira.....	121
Tabela 65 –Teste Tukey para a FV Resina.....	121

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações iniciais.....	18
1.2	Justificativa.....	20
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo geral.....	21
2.2	Objetivos específicos.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	Panorama do Setor Florestal Brasileiro	22
3.2	Painéis de Madeira Aglomerada.....	22
3.2.1	<i>Características dos painéis.....</i>	22
3.2.2	<i>Histórico.....</i>	23
3.2.3	<i>Caracterização econômica</i>	24
3.2.4	<i>Aspectos gerais sobre a produção de painéis</i>	25
3.2.5	<i>Classificação</i>	26
3.2.6	<i>Fabricação.....</i>	27
3.2.7	<i>Fatores que influenciam as propriedades dos painéis.....</i>	28
3.3	Madeiras	31
3.3.1	<i>Seringueira</i>	33
3.3.2	<i>Teca.....</i>	39
3.4	Adesivos.....	42
3.4.1	<i>Resina poliuretana bicomponente PU-Mamona em compósitos lignocelulósicos.....</i>	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1	Materiais	48
4.1.1	<i>Seringueira</i>	48
4.1.2	<i>Teca.....</i>	49
4.1.3	<i>Resina Poliuretana derivado de óleo de mamona (PU-Mamona).....</i>	50
4.2	Procedimentos metodológicos	51
4.2.1	<i>Definição dos tratamentos</i>	51
4.2.2	<i>Preparação das partículas</i>	54
4.2.3	<i>Classificação granulométrica das partículas.....</i>	55

4.2.4	<i>Ensaio para determinação da composição granulométrica</i>	55
4.2.5	<i>Regularização da umidade</i>	57
4.2.6	<i>Cálculo da massa de partículas dos painéis.....</i>	59
4.2.7	<i>Produção dos painéis</i>	60
4.2.8	<i>Realização dos ensaios físicos.....</i>	64
4.2.9	<i>Espectroscopia de infravermelho (FTIR)</i>	67
4.2.10	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</i>	69
4.2.11	<i>Ensaio mecânicos.....</i>	71
4.2.12	<i>Análise estatística.....</i>	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES DA PRIMEIRA ETAPA (ESTUDOS EXPLORATÓRIOS)	77
5.1	Avaliação das propriedades das partículas	77
5.1.1	<i>Teor de umidade.....</i>	77
5.1.2	<i>Composição Granulométrica</i>	77
5.2	Avaliação das propriedades dos painéis	82
5.2.1	<i>Densidade</i>	82
5.2.2	<i>Teor de Umidade</i>	84
5.2.3	<i>Inchamento após 24h</i>	85
5.2.1	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</i>	87
5.2.2	<i>Espectroscopia de infravermelho (FTIR)</i>	91
5.2.3	<i>Módulo de Resistência à Flexão Estática.....</i>	95
5.2.4	<i>Módulo de Elasticidade.....</i>	98
5.2.5	<i>Tração Perpendicular</i>	100
5.3	Considerações Gerais sobre os estudos da primeira etapa.....	103
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SEGUNDA ETAPA DOS ESTUDOS	105
6.1	Avaliação das propriedades das partículas	105
6.1.1	<i>Teor de umidade e composição granulométrica.....</i>	105
6.2	Avaliação das propriedades dos painéis	105
6.2.1	<i>Densidade</i>	105
6.2.2	<i>Teor de Umidade</i>	108
6.2.3	<i>Inchamento Após 24h.....</i>	111
6.2.4	<i>Módulo de Resistência à Flexão Estática.....</i>	115
6.2.5	<i>Módulo de Elasticidade.....</i>	118
6.2.6	<i>Tração Perpendicular (TP)</i>	120
6.3	Considerações Gerais.....	122

7	CONCLUSÕES	123
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A geração de resíduos e a consequente poluição ao meio ambiente, tem representado um dos principais problemas para a Construção Civil nos dias de hoje. Por esse motivo, são importantes as pesquisas no campo de materiais e métodos construtivos da Engenharia Civil que buscam por alternativas para diminuir a poluição e reutilizar materiais que são descartados.

Uma alternativa de material de construção, que é muito usado na construção civil em todo o mundo é a madeira e seus métodos de uso; historicamente vem sendo amplamente utilizada devido suas excelentes características de resistência e durabilidade. Com o desmatamento de florestas brasileiras, como ocorreu com a Mata Atlântica, criou-se leis que proibiram a exploração desse recurso natural. Esse fato adiou os estudos para a elaboração de normas brasileiras objetivando o uso adequado de espécies de madeira nativa como material para construção civil e, consequentemente, na divulgação de suas qualidades e potencialidades.

A desinformação e o mau uso da madeira geraram pré-conceitos com relação ao material que, entretanto, possui excelentes qualidades para diversos usos e principalmente para a construção civil, pois, em várias regiões do mundo verificam-se excelentes exemplos de uso da madeira, desde pequenos objetos até belíssimas edificações.

Ao longo do tempo, a escassez de madeira em âmbito nacional, decorrente dos desmatamentos das florestas e das limitações de uso da madeira sólida, justificou-se os estudos sobre o uso racional da madeira, objetivando minimizar os problemas decorrentes de sua anisotropia, limitações dimensionais e defeitos naturais.

Segundo Paes *et al.* (2011) o diâmetro e comprimento do tronco são as variáveis que limitam as dimensões das peças fabricadas com madeira maciça. A anisotropia provoca variações das propriedades nas direções longitudinal, radial e tangencial e os defeitos como nós, inclinação de grãos, são fatores que afetam diretamente o uso ao qual a madeira é destinada.

Uma solução viável que gradativamente vem substituindo a madeira maciça é a fabricação de derivados de madeira com a utilização de resíduos para agregar valor ao produto (SILVA, 2016).

Os painéis podem ser produzidos a partir de qualquer material lignocelulósico desde que lhes garantam resistência mecânica e peso específico de acordo com o estabelecido pela norma. Esses materiais lignocelulósicos podem formar painéis de madeira sob a ação de temperatura e pressão após a aplicação de adesivo (MENDES *et al.*, 2012).

Para produção de painéis, há necessidade de utilização de adesivos, objetivando aglutinar os elementos que comporão o painel. Os adesivos utilizados são de origem natural ou sintéticos (termoplásticos, termoendurecedores e termofixos).

No Brasil, atualmente, se utiliza a resina sintética à base ureia-formaldeído para produção de painéis aglomerados. Porém as resinas à base de ureia formaldeído têm evidenciado alguns aspectos insatisfatórios decorrente da baixa resistência à ação da umidade e quando aquecidos, produzem gás formaldeído, prejudicando o meio ambiente e o ser humano de modo geral.

Uma alternativa para produção dos painéis é o uso da resina poliuretana derivada do óleo de mamona, diferentemente das resinas a base de ureia, não gera problemas à saúde do aplicador. A poliuretana derivada de óleo de mamona é de origem vegetal, renovável e biodegradável.

De modo geral, os painéis de madeira podem ser gerados a partir de diversos elementos de madeira, com diversas formas e dimensões através de sua reconstituição, com a utilização de métodos e processos pré-determinados para cada tipo de produto final.

Segundo Iwakiri *et al.* (2018), no Brasil, as espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus* provenientes de plantação de rápido crescimento são as mais empregadas para a produção de painéis aglomerados. Embora exista maior área plantada dessas duas espécies, outras espécies como Teca, casca de acácia e Seringueira também são de grande importância econômica para o setor madeireiro brasileiro (GAVA *et al.*, 2015).

Estudos vêm sendo desenvolvidos para avaliar o potencial de uso de espécies alternativas de rápido crescimento (como as supracitadas) para suprimento de madeiras destinadas às indústrias de painéis aglomerados, as quais demandam grande volume de madeiras (IWAKIRI *et al.*, 2018).

A mistura de diversas espécies com características físico-químicas diferentes possibilita a formação de painel aglomerado e contribui para ampliar a oferta de

matéria-prima para as indústrias que requerem grandes volumes de madeira (IWAKIRI *et al.*, 2010).

A realização desse estudo objetivou a produção e avaliação de painéis com partículas de madeiras de Seringueira em associação com partículas de Teca, aglutinando-as com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona.

1.2 Justificativa

Dentre as principais vantagens para o uso de Teca e Seringueira na produção de painéis, além de estarem sendo amplamente reflorestadas no Brasil, possuem propriedades físico-mecânicas apropriadas para a produção de painéis, bem como, por serem oriundas de florestas plantadas, propiciam sustentabilidades às florestas nativas.

A Seringueira é uma espécie brasileira explorada economicamente para produção de látex que, após seu ciclo produtivo, tem sido utilizada para geração de energia, entretanto, estudos realizados sobre suas propriedades físicas e mecânicas indicam ser uma excelente alternativa para produção de painéis.

A Teca é uma espécie oriunda de florestas tropicais do subcontinente Índico e do sudeste asiático. Além da facilidade do seu cultivo, se caracteriza por variar de leve a moderadamente pesada, de dureza média, boa estabilidade dimensional, fácil trabalhabilidade e boa resistência mecânica (PAES *et al.*, 2015). A vantagem do cultivo de Teca no Brasil é a diminuição do seu ciclo de produção devido à suas características edafoclimáticas.

O adesivo poliuretano utilizado neste trabalho é obtido do óleo extraído da mamona, oriundo de uma planta facilmente encontrada, ou cultivada, na maioria das regiões do Brasil e possui demasiada vantagem, pois, se trata de uma matéria-prima natural e renovável. Bem como, o fato de ser classificada como impermeável, apresentar a característica de não ser agressivo ao meio ambiente e ao ser humano e com tecnologia brasileira (DIAS, 2005).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi produzir e avaliar as propriedades físicas e mecânicas e também fazer a análise em nível microscópico dos painéis de partículas homogêneas com misturas de partículas de *Hevea brasiliensis* (Seringueira) e partículas de *Tectona grandis* L. f (Teca), aglutinando-as com resina poliuretana à base de óleo de mamona.

2.2 Objetivos Específicos

Objetivos específicos deste trabalho:

- i. Produzir painéis de partículas de madeira e avaliar suas potencialidades de uso de acordo com as exigências do documento normativo brasileiro e das exigências do mercado consumidor.
- ii. Determinar através dos resultados físicos e mecânicos sua classificação segundo parâmetros da ABNT NBR 14810-1:2013 e NBR 14810-2:2018.
- iii. Analisar morfologia pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e determinar grupos funcionais e ligações presentes com espectroscopia de infravermelho (FTIR).
- iv. Analisar comparativamente as propriedades dos painéis obtidas com 5 e 10% de resina poliuretana à base de óleo de mamona.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Panorama do Setor Florestal Brasileiro

O setor florestal tem importância mundial como fornecedor de energia ou matéria-prima para a indústria da construção civil. No Brasil, por se tratar de um país que está entre os principais detentores de recursos florestais a importância florestal é imensurável (SNIF, 2018).

O Brasil é um país florestal com aproximadamente 493,5 milhões de hectares (58% do seu território) cobertos por florestas naturais e plantadas; sendo o segundo país com maior área de florestas do mundo, atrás apenas da Rússia (SNIF, 2016).

Apesar do setor florestal ter grande destaque na economia nacional, é um setor contraditório, pois, ao mesmo tempo que desenvolveu a silvicultura de florestas plantadas com produção integrada e estrutura produtiva sofisticada, ainda convive com altos índices de desmatamento ilegal de florestas nativas (SNIF, 2018).

A indústria de base florestal encontra-se em um estágio de estímulos significativos. Em janeiro de 2018, as exportações do setor somaram US\$ 901 milhões, uma alta de 17,8%, com evolução em celulose, painéis de madeira e papel (IBÁ, 2018a).

As árvores plantadas representam matéria-prima renovável e reciclável. O Brasil possui 7,84 milhões de hectares plantados de eucalipto, pinus e demais espécies que são responsáveis por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no País (IBÁ, 2017a).

Segundo IBÁ (2017b) 470400 de hectares de árvores plantadas de eucalipto, pinus, acácia, araucária, paricá e Teca são designados à produção de painéis de madeira e pisos laminados.

3.2 Painéis de Madeira Aglomerada

3.2.1 Características dos painéis

Os painéis são compostos de partículas de material celulósico (geralmente madeira), produzidas pela fragmentação de peças ou partículas coladas com um adesivo (ANSI, 1999). Estas placas são produtos utilizados em diversos setores

industriais, principalmente na fabricação de móveis e componentes na construção civil (CRAVO; SARTORI; FIORELLI, 2017).

As chapas de aglomerados podem ser formadas exclusivamente com partículas de madeira de uma espécie ou de mistura de diversas espécies e, mesmo com outros componentes lignocelulósicos ou resíduos madeireiros (GONÇALVES *et al.*, 2018). Dessa forma, segundo Souza *et al.* (2018) os resíduos de madeira podem ser aplicados com a finalidade de agregar valor nos compósitos (chapas), objetivando trazer vantagens econômicas e ambientais para as indústrias, ao invés de descartá-los inadequadamente.

O Medium Density Particleboard (MDP), ou seja, painel de partículas de média densidade é um painel de madeira reconstituída, tal como o MDF e o HDF. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2013), o MDP é formado de partículas de madeira aglutinadas com adesivos sintéticos termofixos, que se consolidam sob a ação conjunta de pressão e calor, apresentando densidade nominal entre 0,551 g/cm³ e 0,750 g/cm³.

O painel de partículas de média densidade é resultante do uso intensivo de tecnologia de prensas contínuas, de modernas tecnologias de classificadores de partículas, aplicação de resinas de última geração e madeira de florestas plantadas (ARAUJO *et al.*, 2019). Os adesivos de última geração podem ser de origem animal, sintéticos termorrígidos ou sintéticos termoplásticos e são definidos de acordo com o destino final do painel.

As matérias-primas para a produção de compósitos de madeira são principalmente madeira serrada, resíduos de serraria e misturas de madeiras de várias espécies (JULIANA; PARIDAH; ANWAR, 2012).

3.2.2 Histórico

De acordo com Iwakiri (2005) os painéis de madeira aglomerada surgiram na Alemanha no início da década de 40, como alternativa para viabilizar a utilização de resíduo de madeira. Dado que, neste período a Alemanha encontrava-se isolada, devido a Segunda Guerra Mundial, acarretando, portanto, na dificuldade da obtenção madeira de boa qualidade para produção de painéis compensados. Ao término da guerra, o processo produtivo e os equipamentos utilizados para a fabricação dos painéis aglomerados foram modernizados e aperfeiçoados (MELO, 2009).

No Brasil, as produções dos painéis aglomerados tiveram início nos anos 60. Por se tratar de um produto novo no mercado interno sofreu questionamentos quanto a sua qualidade, pois se alegava que esses apresentavam alta absorção de água, inchamento em espessura e problemas quanto à fixação de parafusos (MELO, 2009).

Entretanto, a partir dos anos 90, as fábricas brasileiras de painéis aglomerados passaram a investir em tecnologia, resultando na substituição das prensas cíclicas pelas prensas contínuas (CRAVO *et al.*, 2015).

No Brasil, a princípio, as indústrias que produziam os derivados da madeira, utilizavam madeiras de espécies nativas. Com o passar do tempo, motivadas pelo aumento do consumo, distanciamento das reservas naturais e pelas pressões ambientais, as indústrias precisaram encontrar espécies alternativas para a confecção das chapas de madeira. A solução para tal problema foi resolvida com a utilização de madeira de plantios florestais, florestas plantadas, que hoje é utilizada pelas indústrias de papel, chapas de fibras, aglomerados, compensados e madeira serrada (MÜZEL, 2013).

Dentre as indústrias no Brasil, a Masisa é a principal produtora de painéis da América Latina, com produção equivalente a 19% da capacidade instalada, seus principais produtos são os painéis MDF e MDP (SILVA, 2016).

3.2.3 Caracterização econômica

O Brasil é destaque mundial na fabricação de painéis de madeira reconstituída a partir de árvores plantadas. Este fato se deve aos contínuos investimentos em tecnologia e automação das empresas e processos produtivos, além das melhores práticas e operações florestais.

Muitas empresas no país, de acordo com IBÁ (2017c), construíram modernos parques industriais destinados à instalação de novas unidades, à atualização tecnológica das plantas, à implantação de linhas contínuas de produção e aos novos processos de impressão, de impregnação, de revestimento e de pintura.

A Figura 1 ilustra, no período entre 2009 e 2018 a quantidade de produção, importação e exportação de painéis de madeira no Brasil.

Figura 1 - Evolução da produção, importação e exportação dos painéis de madeira no Brasil (mil m³):

Ano	Produção	Importação	Exportação
2009	5.283	160	179
2010	6.434	183	127
2011	6.472	192	164
2012	7.304	112	253
2013	7.893	107	350
2014	7.977	77	421
2015	7.465	10	641
2016	7.540	5	1.051
2017	7.937	4	1.273
2018	8.158	5	1.326

Fonte: (IBÁ, 2018a).

De acordo com IBÁ (2018a) em janeiro de 2018:

“O setor florestal registrou avanço nas negociações com o mercado externo em painéis e em papel. Os painéis de madeira avançaram 8,2%, alcançando 92 mil m³, sendo a América Latina responsável por mais da metade de todo o volume exportado pelo país, o que significa US\$12 milhões, avanço de 9,1% em relação a janeiro de 2017. Bem como o mercado interno de painéis de madeira registrou avanço de 13,3% em suas negociações, totalizando 572 mil m³ vendidos”.

3.2.4 Aspectos gerais sobre a produção de painéis

A utilização dos painéis de madeira está diretamente ligada às propriedades físicas e mecânicas que estes apresentam. De acordo com Weber e Iwakiri (2015) as restrições técnicas para o uso e a aplicação de diferentes tipos de painéis de madeira abrangem características como resistência mecânica, resistência à fixação de parafusos, estabilidade dimensional, uniformidade da superfície e usinabilidade.

Quanto à matéria-prima para a confecção dos painéis, as características da madeira como densidade, pH, extrativos e geometria das partículas interferem no processo de colagem e qualidade dos painéis produzidos (WEBER; IWAKIRI, 2015).

Os aglomerados apresentam densidades entre 0,59 a 0,80 g/cm³, as vantagens destes são atribuídas à sua estrutura homogênea, possibilidade de utilização de matéria-prima sem restrições quanto à forma e às dimensões (IWAKIRI, 2005).

Os painéis exibem uma série de vantagens sobre a madeira sólida, entre elas, de acordo Müzel *et al.* (2015), na capacidade de reciclagem, maior homogeneidade, possibilidade de produção de partes de grandes dimensões, capacidade de imobilizar

grande quantidade de dióxido de carbono da atmosfera em sua massa, e demanda de menos energia para transporte e instalação.

De acordo com IBÁ (2017d), o MDP tem grande estabilidade dimensional (largura, comprimento e espessura), boa resistência à flexão e ao arranque de parafusos.

O MDP é indicado, principalmente, para a produção de móveis residenciais e comerciais de linhas retas devido às suas características dimensionais, físicas e mecânicas. São aplicados especialmente em portas retas, laterais de móveis, prateleiras, divisórias, tampos, bases, frentes e laterais de gaveta. É importante que todas as faces e bordas do painel estejam revestidas com acabamento, mesmo as não aparentes, para garantir maior durabilidade (IBÁ, 2017d).

No Brasil, a normalização dos painéis é regida pelas NBR 14810-1 (ABNT, 2013) e 2 (ABNT, 2018) que procuram garantir a qualidade e verificar para qual uso o painel pode ser destinado de acordo com os resultados físicos e mecânicos definidos pelas normas.

Dentre os principais parâmetros físicos são analisados a espessura, largura, comprimento, esquadro, retilineidade, densidade aparente, teor de umidade e inchamento em espessura após 24 horas. Enquanto que dentre os principais fatores em relação às características mecânicas, são analisadas a Resistência à Tração Perpendicular ou Adesão Interna (TP), Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE) e Arrancamento de Parafuso.

3.2.5 Classificação

De acordo com a NBR 14810-2 da ABNT (2018), os painéis de partículas de média densidade são classificados em seis tipos, definidos como:

- 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;

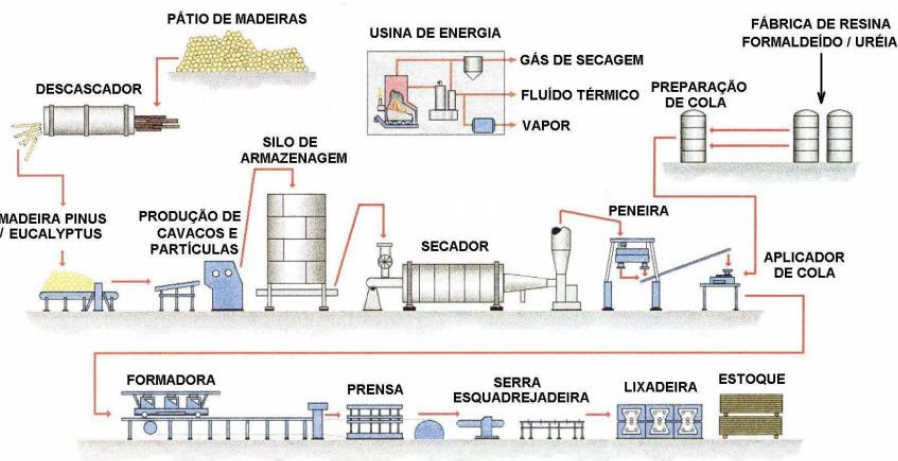
3.2.6 Fabricação

3.2.6.1 Processo de fabricação industrial

O processo de produção de painéis de madeira aglomerada de acordo com Iwakiri (2005) envolve as etapas de geração de partículas, secagem, classificação, aplicação de adesivo e de aditivos químicos, formação do colchão, pré-prensagem, prensagem a quente, resfriamento/acondicionamento, acabamento, classificação, embalagem e armazenamento. A Figura 2 ilustra as etapas do processo de fabricação industrial dos painéis aglomerados.

Para se obter partículas com dimensões ideais para produção dos painéis é necessário que a madeira seja submetida a processos de redução primária e secundária. Após a obtenção das partículas, estas devem ser secas, na sequência, impregnadas com resinas e aditivos e distribuídas de maneira uniforme formando um colchão de partículas, no qual é aplicado pressão a altas temperaturas (MÜZEL, 2013). Como resultado final, o colchão adquire a forma definitiva e estável denominada aglomerado.

Figura 2 - Cadeia Produtiva de painéis de madeira aglomerada.



Fonte: Adaptado de Iwakiri (2005).

3.2.7 Fatores que influenciam as propriedades dos painéis

3.2.7.1 **Densidade**

A densidade da matéria prima tem uma influência significativa sobre as propriedades dos painéis aglomerados e, também, no processo de produção (ARAUJO *et al.*, 2019).

Um dos aspectos a serem considerados para a produção de painéis de madeira é a relação entre a densidade do painel e a densidade da madeira utilizada como matéria-prima, esta relação é denominada de razão de compactação que representa o grau de densificação do painel e tem grande influência em suas propriedades.

O intervalo da razão de compactação considerado ideal é entre 1,3 e 1,6 (ARAUJO *et al.*, 2019). Por esta razão, madeiras de baixa densidade auxiliam na obtenção de uma boa razão de compactação enquanto que as de maior densidade diminuem a razão de compactação ideal. Painéis com maior razão de compactação possuem maior quantidade de partículas de madeira e, conseqüentemente, maior densificação do painel.

Maiores valores de razão de compactação, de acordo com Trianoski *et al.* (2013), refletem maior resistência mecânica, pois, em um mesmo volume de produto encontram-se maiores quantidades de partículas, as quais são muito mais comprimidas e com melhor contato para atingir uma mesma espessura final. Em contrapartida, a maior compressão das partículas tende a aumentar as tensões internas as quais são liberadas após a prensagem (TRIANOSKI *et al.*, 2013).

De acordo com Araujo *et al.* (2019) chapas de partículas feitas com espécies de baixa densidade têm maior resistência à flexão, módulo de elasticidade, adesão interna e resistência à tração, pois apresentam maior qualidade de colagem.

Maloney (1993) afirma que madeiras com massa específica de até 0,55 g/cm³ são as mais adequadas para a produção de aglomerados, pois proporcionam painéis mais leves com razão de compactação adequada.

3.2.7.2 **Geometria das partículas**

A geometria das partículas é uma das principais variáveis que interferem nas propriedades das chapas de madeira aglomerada. Influenciando os resultados dos ensaios de flexão estática, tração paralela e perpendicular à superfície da chapa.

Quando se trata de fibras, a rigidez à flexão das fibras está intimamente relacionada extensibilidade, uma vez que os resultados de flexão são uma extensão de um lado e uma compressão do outro lado de uma fibra (ABDUL KHALIL *et al.*, 2010).

As partículas que apresentam maior comprimento são as que fornecem melhor resistência mecânica ao painel. Porém partículas que apresentam comprimentos muito grandes entopem equipamentos, geram problemas na secagem, aplicação de adesivo e formação do colchão, pois se tornam volumosas (ARAUJO *et al.*, 2019).

Painéis confeccionados com partículas mais finas, de modo geral, garantem melhor estabilidade na espessura. O aumento do número de interfaces partícula-partícula aliado à menor massa de cada partícula, possibilita uma melhor dispersão do inchamento higroscópico nas lacunas interpartículas (ALBUQUERQUE, 2002).

Segundo Moslemi (1974) apud Albuquerque (2002), partículas mais curtas e espessas formam painéis com menor inchamento, porém, com maior instabilidade linear, em razão da maior proporção de partículas verticalmente posicionadas durante a confecção do painel.

3.2.7.3 Teor de Extrativos

Os extrativos são materiais produzidos principalmente durante a formação do cerne. Seus efeitos estão relacionados à redução da higroscopicidade e da permeabilidade da madeira. A concentração de extrativos nas camadas superficiais da madeira pode bloquear a passagem de água e retardar a sua taxa de evaporação, além da interação negativa com o adesivo, prejudicando seu processo de cura e aumentando o tempo necessário de prensagem de um painel (RAZERA, 2006).

De acordo com Iwakiri (2005) a porcentagem de extrativos na madeira pode variar de 5% a 30%. Na questão da influência dos extrativos na polimerização e cura da resina, o elevado teor de extrativos pode afetar a resistência à adesão interna, bem como, os extrativos nas superfícies empobrecem o umedecimento do adesivo, prejudicando sua penetração e fluxo. A interação da madeira com o adesivo é melhor quando o teor de extrativos é menor (GAVA *et al.*, 2015).

3.2.7.4 *Acidez*

Na colagem do painel deve-se considerar a influência do pH tanto da madeira quanto do adesivo, pois a acidez da madeira irá influenciar na cura da resina utilizada para a colagem.

O pH da madeira varia conforme a espécie e situa-se normalmente na faixa de 3 a 6. Pode ocorrer mudança de pH dentro de uma mesma peça de madeira, em função da migração de extrativos de camadas mais internas para camadas superficiais, alterando as condições de colagem (RAZERA, 2006);

O pH da resina não deve ultrapassar os limites mínimo de 1,5 e máximo de 11, pois podem resultar na degradação das fibras da madeira e prejudicar na colagem do produto (DIAS, 2005). Madeiras que possuem valores quase neutros, revela um aspecto positivo para produção de painéis (GAVA *et al*, 2015).

De acordo com Maloney (1993) e Moslemi (1974), madeiras com pH muito ácido podem causar a pré-cura da resina ureia-formaldeído na fase de fechamento da prensa, o que prejudica a adesão entre as partículas e reduz as propriedades dos painéis. Enquanto que, madeiras com pH pouco ácido necessitam de uma quantidade maior de catalisador para acelerar a cura da resina ureia-formaldeído (IWAKIRI *et al.*, 2018). Para diminuir a influência do pH tanto do adesivo como o da madeira na cura do adesivo é utilizado catalisador e endurecedores, que são produtos como cloreto de amônia e sulfato de amônia (MÜZEL, 2013).

3.2.7.5 *Teor de Umidade*

O teor de umidade das partículas é um dos fatores mais importantes para a produção de painéis de madeira aglomerada. Para Iwakiri (2005), o teor de umidade das partículas exerce influência sobre a cura da resina, tempo de prensagem e pressão necessária para a consolidação do painel.

O teor de umidade do colchão é responsável pela migração do calor entre as partículas de madeira da superfície para o centro do painel, desempenhando um papel importante, também, para a cura da resina.

Quando a umidade das camadas superficiais do painel é vaporizada, pelo contato com os pratos aquecidos da prensa, este vapor migra para o miolo do painel e, desta forma, a resina reage mais facilmente (ZAMARIAN, 2016).

No caso da formação de painéis aglomerados, a principal transferência de calor se faz pela convecção, que consiste na movimentação do vapor aquecido, seguido pela condução, que se resume na transmissão de calor pelo contato entre as partículas de madeira (ALBUQUERQUE, 2002).

De acordo com Kollman *et al.* (1975) apud Müzel (2013) a umidade das partículas após a secagem pode variar entre 3% e 12%. Para se obter uma boa colagem, o teor de umidade das partículas deverá permitir uma boa penetração do adesivo.

3.2.7.6 Tempo de prensagem

O tempo de prensagem deve ser o suficiente para possibilitar a migração do vapor d'água para as bordas da chapa e sua liberação até o término da prensagem (IWAKIRI, 1989).

De acordo com Trianoski *et al.* (2015), o aumento do tempo de prensagem proporcionou aumento nos valores de MOR e do MOE dos painéis, causados, provavelmente, pela melhor polimerização e cura do adesivo.

3.2.7.7 Temperatura de prensagem

A principal função da temperatura de prensagem é ajudar a consolidar as placas na densidade e espessura desejados por meio da aceleração da polimerização do adesivo disperso entre as partículas e a plastificação da madeira, reduzindo a resistência a compressão (MATOS, 1988),

De acordo com Heebink *et al.* (1982) apud Iwakiri (1989), quanto maior a temperatura de prensagem, mais rápido será o fluxo de calor, permitindo melhor densificação das camadas mais internas dos painéis, resultando em maior resistência das ligações internas e menor resistência à flexão.

3.3 Madeiras

A madeira utilizada para confeccionar painéis aglomerados como matéria-prima é oriunda de reflorestamento. Estudos mostram a viabilidade técnica de produção de aglomerados com espécies nativas e exóticas, de baixa e alta massa específica, pura

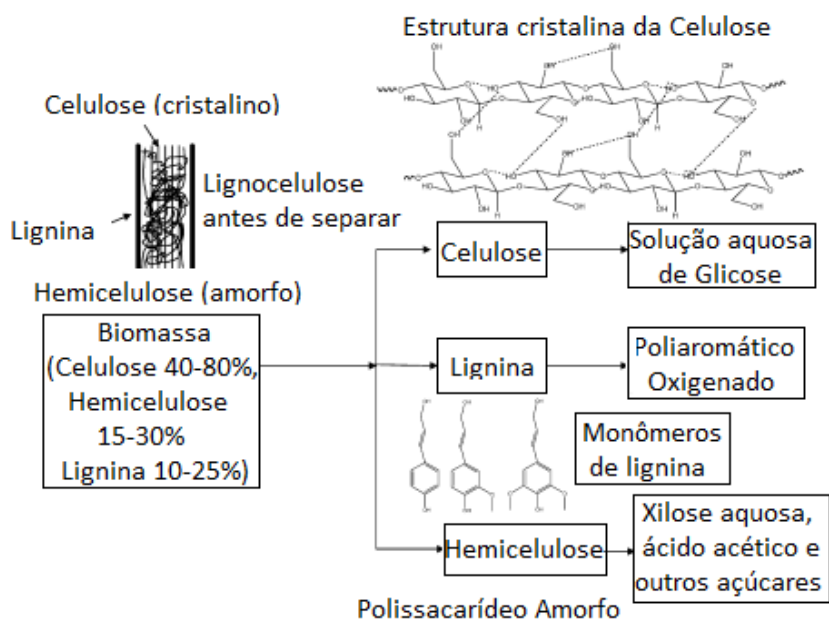
ou em mistura, com desempenho físico-mecânico que atendem aos requisitos da norma brasileira (SOZIM *et al.*, 2019).

Madeiras de florestas plantadas dos gêneros Pinus e Eucalipto são muito usadas na produção desses painéis. No entanto, a crescente demanda do mercado por madeira não segue o mesmo ritmo de sua oferta, sendo necessária a busca de matérias-primas lignocelulósicas alternativas (CRAVO; SARTORI; FIORELLI, 2017).

As partículas de madeira ricas em hidroxilas, são interessantes para estruturas como os poliuretanos, onde os grupos hidroxilas dessas partículas podem formar ligações químicas importantes com os grupos NCO dos diisocianatos.

A madeira, assim como a biomassa lignocelulósica é formada por celulose, hemicelulose e lignina, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Estruturas de diferentes frações de biomassa (lignocelulose, celulose, lignina e hemicelulose) antes e depois da reação.



Fonte: Adaptado (HUBER; IBORRA; CORMA, 2006)

De acordo com Tejado *et al.* (2007) a lignina é criada por polimerização enzimática de três monômeros, que resultam nas unidades guaiacil, siringil e p-hidroxifenilpropano. Os principais grupos funcionais químicos da lignina incluem hidroxila, metoxil, carbonila e carboxil em várias quantidades e proporções, variando com a origem genética e os processos de extração (EFFENDI; GERHAUSER; BRIDGWATER, 2008), observados principalmente na região do espectro entre 1400-1100 cm^{-1} . Por sua vez, segundo Huber, Iborra, e Corma (2006) a hemicelulose é um

polímero amorfo complexo, cujo principal componente é uma unidade de monômero de xilose.

Quanto a celulose, esta é um polissacarídeo que consiste em unidades de D-glicose ligadas por ligações do tipo β (1-4) glicosídicas (ZHANG; YUAN; XU, 2017). Tem como característica, a presença de grupos hidroxila que garante às moléculas de celulose considerável reatividade e consequentemente refletindo em seu comportamento físico e químico.

3.3.1 Seringueira

A Seringueira, *Hevea brasiliensis*, é uma espécie nativa da região amazônica do Brasil, onde são conhecidas cerca de dez espécies (IWAKIRI *et al.*, 2018). A Figura 4 representa a área onde ocorrem naturalmente as espécies de Seringueira.

Figura 4 - Área de ocorrência natural das espécies de Hevea.



Fonte: Souza (2018).

A árvore de Seringueira é caracterizada como de madeira leve, cor creme branco a pálido, boas propriedades de usinagem e trabalho e, uma densidade dependente da idade da árvore, variando de 0,48 a 0,65 g/cm³ (LIM; GAN; CHOO, 2003).

A árvore da espécie *Hevea brasiliensis* é explorada economicamente para produção de látex (borracha) de melhor qualidade. A produção de borracha natural não requer muita energia, e as árvores contribuem para a fixação de CO₂, ajudando a minimizar os problemas com o efeito estufa (IAC, 2012).

No Brasil, após o ciclo produtivo do látex, a madeira de Seringueira é utilizada para produção de energia. A árvore, da qual se extrai o látex para a produção de borracha natural, tem o ciclo de produção esgotado entre 25 a 30 anos, quando surge uma nova oferta de madeira (TEIXEIRA *et al.*, 2001).

Em âmbito nacional e internacional, a madeira da Seringueira tem sido pouco utilizada como matéria-prima na indústria de produtos à base de madeira, como por exemplo, madeira serrada e madeira reconstituída.

Atualmente as pesquisas possuem como finalidade o uso da Seringueira nas indústrias madeireiras. Estes estudos visam desenvolver novos produtos para aumentar o valor dessa madeira no final do ciclo de produção do látex, criando uma nova renda aos produtores brasileiros de látex (MÜZEL *et al.*, 2015).

Os painéis de aglomerado estão sendo fabricados na Malásia principalmente a partir de Seringueira (*Hevea brasiliensis*) e outras espécies de madeira de lei há décadas (JULIANA; PARIDAH; ANWAR, 2012).

De acordo com Juliana, Paridah e Anwar (2012), devido à cor atraente e aparência dos anéis de crescimento, o tronco da Seringueira foi usado para móveis e acessórios de interiores, pisos domésticos, componentes de escadas e fabricação de utensílios de cozinha.

O maior problema da utilização da madeira de Seringueira é a alta susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos, devido à ausência de cerne na madeira e a um alto teor de amido e açúcares, como pode ser observado em sua composição química apresentada na Tabela 1 (GONÇALVES, 2002).

Tabela 1 - Composição química da madeira de Seringueira.

Constituintes	Porcentagem (%)
Celulose	43,9
Lignina	23,3
Pentoses	18,0
Resinas	3,9
Outros	10,9

Fonte: Gonçalves (2002).

De acordo com Müzel (2013), a madeira da Seringueira possui densidade aparente variando 0,56 a 0,65 g/m³ e apresenta boas características de tratabilidade (colagem, pregação e furação). É uma madeira que pode ser curvada facilmente com o uso de vapor e tingida com facilidade.

De acordo com Kronka (2010) a principal virtude da Seringueira, para a fabricação de moveis, consiste na regularidade de sua textura e cor, que permitem dar acabamento satisfazendo as diferentes exigências do mercado. Além disso, existem grandes áreas plantadas com Seringueiras no Estado de São Paulo, concentradas nas regiões do chamado Polo da Borracha. Coincidentemente, no Polo Moveleiro, onde atuam indústrias madeireiras, encontram-se 90% dos seringais existentes (KRONKA, 2010).

Müzel *et al.* (2015) avaliaram o uso de folhas de bambu da espécie *Phyllostachy sedulis* como reforço estrutural para painéis de MDP fabricados com madeira da espécie *Hevea brasiliensis*. Para a colagem das partículas de Seringueira foi utilizada a resina uréia-formaldeído na proporção de 12%, sendo os painéis pressionados a uma temperatura de 140°C e pressão específica de 40kgf/cm² por 12 minutos. Os valores obtidos pelos autores, para inchamento após 24 horas, Módulo de Resistência à Módulo de ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) estão apresentados na Tabela 2. A introdução do bambu no reforço das chapas melhora as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, reduzindo em 47,08% o inchamento e aumentando em 431 % o MOR e em 143% o MOE.

Tabela 2 - Resultados dos painéis obtidos por Müzel *et al* (2015).

Propriedades	Unidade	Média	Coeficiente de variação (%)
Inchamento após 24 horas	%	29,35	4,98
Módulo de ruptura (MOR)	MPa	10,52	24,72
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	1746,83	22,07

Fonte: Müzel *et al* (2015).

Iwakiri *et al.* (2018) estudaram a madeira de *Hevea brasiliensis* em mistura com madeiras de três espécies de *Eucalyptus* utilizando a resina ureia-formaldeído para a produção de painéis aglomerados. A densidade nominal utilizada para o cálculo da massa de partículas foi de 0,75 g/cm³ e a densidade específica média obtida para as partículas de Seringueira foi de 0,572 g/cm³. Os painéis foram prensados à temperatura de 160°C, pressão específica de 40 kgf/cm² e tempo de prensagem de 8 minutos. Os resultados encontrados pelo autor de densidade do painel, absorção de água após 2 e 24 horas, inchamento em espessura após 2 e 24 horas, tração

perpendicular, módulo de ruptura e módulo de elasticidade estão representados na Tabela 3.

De acordo com os autores, os resultados físicos indicaram maiores percentuais de absorção de água com o aumento na proporção de partículas de *Hevea* na composição dos painéis, sendo indicativa da influência da maior massa específica da madeira de *Hevea* e consequente redução na razão de compactação dos painéis, facilitando a entrada de água. Quanto aos resultados mecânicos os painéis de Seringueira obtiveram valores maiores do que os painéis com eucalipto, uma vez que a madeira de *Hevea* tem maior massa específica, portanto, menor área superficial das partículas e aumento na distribuição de resina.

Tabela 3 - Resultados dos painéis obtidos por Iwakiri *et al.* (2018).

Propriedades	Unidade	Média	Coeficiente de variação (%)
Densidade	g/cm ³	0,751	5,7
Absorção após 2 horas	%	26,52	-
Absorção após 24 horas	%	76,77	-
Inchamento após 2 horas	%	9,71	-
Inchamento após 24 horas	%	35,55	-
Tração Perpendicular (TP)	MPa	0,78	-
Flexão Estática (MOR)	MPa	14,5	-
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	2205	-

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

Gava *et al.* (2015) avaliaram o potencial de uso da madeira de *Hevea brasiliensis* (clones GT1 e RRIM600), com resina de poliuretano à base de mamona para a produção de painéis de partículas de madeira. Os painéis foram produzidos com uma densidade nominal de 0,80 g/cm³, foi utilizado 12% de resina em relação à massa seca e as chapas foram prensados a uma temperatura de 140 °C com pressão específica de 40kgf/cm² durante 12 min. Como resultado da análise físico-química das partículas obteve-se 9,21% de umidade das partículas, 14,55% de total de extrativos das partículas, 7,28 de pH (quente) e 6,43 para o pH (frio). Os resultados obtidos para os painéis homogêneos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos painéis obtidos por Gava *et al.* (2015).

Propriedades	Unidade	Média	Coeficiente de variação (%)
Densidade	g/cm ³	0,842	6,79
Umidade	%	5,74	4,17
Absorção após 2 horas	%	10,16	14,81
Absorção após 24 horas	%	38,80	6,18
Inchamento após 2 horas	%	3,72	13,02
Inchamento após 24 horas	%	17,09	6,18
Tração Perpendicular (TP)	MPa	2,68	11,61
Flexão Estática (MOR)	MPa	13,21	20,88
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	1893,55	18,79

Fonte: Gava *et al.* (2015).

Abdul Khalil *et al.* (2010) estudaram painéis de fibras híbridas de média densidade (MDF) produzidos usando Seringueira (RW) e cacho de frutas (EFB). Foram estudadas proporções diferentes de Seringueira e cacho de frutas, sendo elas 20:80 (EFB: RW) e 50:50 (EFB: RW), ambas a 65% e 93% de umidade relativa (UR). Pelas análises, os autores verificaram que a propriedade dos compósitos diminui com o aumento da umidade relativa e do tempo de armazenamento. As placas foram produzidas com densidade média de 0,650 g/cm³, aglutinadas com 12% de resina ureia formaldeído, utilizando pressão de 3500 MPa à 200°C. A Tabela 5 representa os resultados dos ensaios mecânicos dos painéis confeccionados por Abdul Khalil *et al.* (2010).

Tabela 5 - Resultados mecânicos obtidos por Abdul Khalil *et al.* (2010).

Propriedades	Unidade	Tratamentos	
		20:80	50:50
Tração Perpendicular (TP)	MPa	0,73	0,69
Flexão Estática (MOR)	MPa	32,21	30,99
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	2634	2356

Fonte: Abdul Khalil *et al.* (2010).

Abdul Khalil *et al.* (2010) verificaram que os painéis com maior quantidade de Seringueira aumentam as propriedades mecânicas, pois as fibras EFB não conseguem suportar altas cargas, levando a ruptura da fibra, provavelmente, devido ao menor teor de α -celulose (17,2%) presente nas fibras EFB em comparação com as fibras de borracha que consistem em 44,7% de α -celulose. De acordo com os autores a resistência da ligação interna do MDF híbrido diminuiu com o tempo de armazenamento e umidade relativa, devido à relativa fragilidade e incapacidade da

resina UF, que se plastifica devido a água e induz tensão dentro da ligação, o que leva a ruptura. Os resultados mostraram que o MDF híbrido produzido a partir de EFB: RW, 50:50 apresentaram inchamento em espessura e absorção de água mais altos quando comparados aos MDF híbridos com EFB: RW, na proporção 20:80 devido às propriedades das fibras de madeira de Seringueira. As fibras de Seringueira apresentam menor teor de grupo hidroxila livre devido à menor quantidade de holocelulose e lignina presentes na fibra, portanto, as fibras de Seringueira são mais estáveis em relação à água.

Juliana, Paridah e Anwar (2012) avaliaram painéis de partículas de três camadas utilizando partículas de Seringueira (RW) nas camadas superficiais e partículas de kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) no meio dos painéis. As proporções de matérias-primas variaram de 30% a 70% de Seringueira e kenaf. Foram utilizadas partículas do núcleo da kenaf (KC) e do caule da kenaf (KS). Para produção dos painéis utilizaram-se partículas com 5% de umidade aglutinadas com 10% de resina de ureia formaldeído e prensadas a uma temperatura de 160 °C com pressão de 160 kg/cm² por 6 min. As amostras foram controladas para obterem 12 mm de espessura e densidade de 0,70 g/cm³. Os autores realizaram os testes mecânicos e físicos de acordo como padrão industrial japonês, JIS A 5908: 2003 (E) e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados encontrados pelos painéis avaliados por Juliana, Paridah e Anwar (2012).

Tipo de Painei/Propriedades	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	TP (N/mm ²)	I24 (%)	AA (%)
70% RW/ 30% K	15,1	2107,5	0,38	45	115,5
50% RW/ 50% K	13,1	1925,5	0,36	50	127,5
30% RW/ 70% K	12,7	1933,5	0,24	62,5	146

Fonte: Juliana, Paridah e Anwar (2012).

Juliana, Paridah e Anwar (2012) verificaram que o aumento da quantidade de partículas RW nas camadas de superfície melhoraram o desempenho das placas, a incorporação de RW na estrutura de aglomerado melhorou as propriedades mecânicas dos painéis verificando que a presença de partículas de madeira de Seringueira na camada superficial dos painéis de partículas melhorou as propriedades de elasticidade além de permitirem menor inchamento e absorção de água.

3.3.2 Teca

A *Tectona grandis*, popularmente conhecida como Teca, é uma espécie arbórea decídua, nativa de florestas tropicais situadas entre 10° e 25° de latitude Norte, no subcontinente Índico e do sudeste asiático, principalmente na Índia, Burma, Tailândia, Laos, Camboja, Vietnã e Java (VIEIRA *et al.*, 2007 apud CHAGAS *et al.*, 2014).

Pertencente à família Lamiaceae, a Teca é uma espécie de grande importância econômica, apresenta robustez e desenvolvimento vigoroso. O seu valor econômico está associado à sua variabilidade de uso (móveis, elementos estruturais e uso marinho) e grande qualidade da sua madeira, que possui propriedades físico-mecânicas desejáveis (MACEDO NETO, 2019).

Além da facilidade do seu cultivo, a madeira de Teca adulta é leve a moderadamente pesada, de dureza média, boa estabilidade dimensional, fácil trabalhabilidade e boa resistência mecânica (PAES *et al.*, 2015).

De acordo com Lima, Pimentel e Garcia (2011) a madeira de Teca é considerada nobre, valorizada pela beleza, resistência e durabilidade.

A madeira desta espécie é considerada imune à ação dos insetos e fungos que causam o apodrecimento, podendo ser enterrada, exposta ao tempo ou à água do mar sem sofrer danos significativos (MOTTA *et al.*, 2013).

De acordo com Garcia e Marinonio (2016) a madeira de Teca é porosa a semiporosa com anéis de crescimento distintos demarcados por linhas de parênquima marginal, com alburno claro, bem distinto do cerne, com cor marrom viva e brilhante.

O cerne apresenta alta durabilidade natural e estabilidade dimensional. Essas características existem devido à presença de algumas substâncias, como o caucho, espécie de látex responsável pela redução de absorção de água, e a tectoquinona, um preservativo natural contido nas células da madeira (NARAYANAMURTI e SINGH, 1960; PREMRASMI; DIETRICH, 1967; YAMAMOTO *et al.*, 1998; KOKUTSE *et al.*, 2006 apud GARCIA; MARINONIO, 2016)

A média das densidades aparentes da Teca é de 0,65 g/cm³, apesar de ser leve, apresenta uma boa resistência, semelhante ao mogno brasileiro, sua madeira é estável e sob mudança de umidade praticamente não empena durante a secagem (LIMA; PIMENTEL; GARCIA, 2011).

No Brasil, a árvore de Teca é plantada, principalmente, em três estados, Mato Grosso, Roraima e Pará. A espécie foi introduzida no País na década de 60, no

município de Cárceres-MT (MACEDO NETO, 2019). Sendo o estado do Mato Grosso o pioneiro nos plantios de Teca devido às suas condições edafoclimáticas favoráveis (CHAGAS *et al.*, 2014).

No ano de 2012 o total de área plantada de Teca foi de 67.329 ha, sendo a região Centro-Oeste responsável por 67,4% e a Norte por 32,6% (ABRAF, 2013).

A vantagem da produção de Teca no Brasil é a diminuição do seu ciclo de produção, pois em suas áreas de origem o ciclo tem duração, em média, de 80 anos, enquanto que, na região de Cárceres-MT esse ciclo reduz para 25 anos (COSTA, 2011)

O acelerado crescimento da Teca em algumas regiões brasileiras e a formação de fuste retilíneo impulsionou o plantio em larga escala para a produção de madeira serrada para o mercado externo (CHAGAS *et al.*, 2014).

Lacombe (2015) estudou a produção de painel de madeira utilizando serragem residual (partículas de pinus, eucalipto, peroba e Teca) com plástico EPS (isopor) como adesivo. Para produção dos painéis de Teca foi utilizado juntamente com o adesivo, o solvente thinner. A densidade das partículas de Teca utilizada era de 0,66 g/cm³. Os resultados obtidos nos ensaios dos painéis de densidade, umidade, absorção após 2 e 24 horas, inchamento em espessura após 2 e 24 horas, tração perpendicular (TP), módulo de ruptura (MOR) e módulo de Elasticidade (MOE) encontram-se apresentados na Tabela 7.

Os valores de absorção observados podem ser reflexo da densidade do painel de Teca que apresentou valores abaixo da média, gerando maior quantidade de vazios internamente, os quais absorveram água a mais que o necessário. Comparando inchamento em espessura com absorção de água, o autor constatou que mesmo havendo muita entrada de água nos painéis de baixa densidade estes praticamente não incharam.

Tabela 7 - Resultados dos painéis obtidos por Lacombe (2015).

Propriedades	Unidade	Média	Coeficiente de variação (%)
Densidade	g/cm ³	0,478	0,03
Umidade	%	5	0,03
Absorção após 2 horas	%	28,59	0,19
Absorção após 24 horas	%	43,88	0,11
Inchamento após 2 horas	%	0,70	0,77
Inchamento após 24 horas	%	0,84	0,61
Tração Perpendicular (TP)	MPa	0,23	0,45
Flexão Estática (MOR)	MPa	1,92	0,27
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	245,19	0,18

Fonte: Lacombe (2015).

Souza *et al.* (2018) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de estudar a viabilidade de produzir aglomerados utilizando resíduos sólidos de *Pinus sp* e Teca aglutinados com 5% da resina ureia-formaldeído em relação à massa seca das partículas, associados a resíduos de tinta à base de epóxi como adesivo alternativo. Os autores fabricaram 45 tratamentos (T), variando os parâmetros de produção, entre eles, densidades baixa (0,60 g/cm³), média (0,70 g/cm³) e alta (0,80 g/cm³); porcentagem de resina epóxi com 20, 30 e 40% e, adição de partículas de Teca nas proporções com, 25, 50, 75, 100%. As partículas de Teca possuíam umidade de 5,4% e predominância das dimensões entre 0,595 mm (31,9%) e 1,19 mm (42,1%). Para verificar o teor de umidade médio dos painéis, foi retirado um corpo-de-prova de cada um dos dez painéis selecionados aleatoriamente dentre os 135 painéis produzidos, sendo obtida umidade média de 7,90 %.

A Tabela 8 representa os resultados dos ensaios físicos e mecânicos em painéis confeccionados com 100% de partículas de Teca, densidade nominal de 0,8 g/cm³ e três porcentagens de resina epóxi.

Tabela 8 - Resultados dos painéis obtidos por Souza *et al.* (2018).

Propriedades	Unidade	Teor de Resíduo (%)			Média
		20	30	40	
Densidade	g/cm ³	0,84*	0,86*	0,88*	0,86*
Inchamento após 24 horas	%	10,4*	7*	4,4*	7,27*
Tração Perpendicular (TP)	MPa	1,7*	1,7*	1,9*	1,77*
Flexão Estática (MOR)	MPa	18*	20*	21*	19,67*
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	4100*	3800*	3750*	3883,33*

Fonte: Souza *et al.* (2018)

*Valores aproximados.

Os resultados encontrados por Souza *et al.* (2018) para os painéis de alta densidade fabricados com maiores proporções de Teca e resíduos de resina epóxi, alcançaram os requisitos mínimos exigidos pela NBR 14810: 2 (ABNT, 2013).

3.4 Adesivos

A ABNT NBR 14810-1 (2013) define o termo adesivo ou resina como a substância utilizada com o objetivo de aglutinar partículas de madeira em um painel, podendo ser inorgânica ou orgânica.

De acordo com Iwakiri (2005), os adesivos utilizados para a colagem de madeiras podem ser classificados em adesivos naturais (derivados proteicos de origem animal ou vegetal, derivados do amido, éter celulósico e borracha natural), adesivos sintéticos termoplásticos (polivinil/acetato, polivinil/acrilato, polietileno, polistírol e borracha sintética), adesivos sintéticos termoendurecedores / termofixos (ureia-formaldeído, melamina-formaldeído, fenol-formaldeído, resorcina-formaldeído, tanino-formaldeído).

Conforme descrito por Iwakiri (2005), os fatores que influenciam na colagem de painéis de madeira se constituem da composição e características da madeira, características físico-químicas do adesivo, procedimentos empregados na colagem e condições de uso do produto final.

Nos painéis aglomerados, as características físico-químicas dos adesivos devem ser estudadas para verificar o comportamento no processo de aglutinação das partículas. Com base em Iwakiri (2005) as características físico-químicas que devem ser analisadas são:

“a) Viscosidade: definida pela resistência ao fluxo livre entre as camadas de uma matéria ou, ainda, a grandeza que expressa o atrito entre as moléculas de um fluido livre e que se manifesta através do escoamento. b) Tempo de formação de gel/tempo de gelatinização/"gel time": corresponde ao período transcorrido desde o preparo do adesivo até a sua aplicação, incluindo a composição com aditivos. Sua importância, está na vida útil e reatividade do adesivo. c) Teor de sólidos: representa a quantidade de sólidos existentes no adesivo que é formado por componentes sólidos e líquidos, estes últimos são volatilizados durante a prensagem a quente, ocorrendo o primeiro processo de cura e solidificação da resina. d) pH: com a determinação feita diretamente por meio do pHmetro, e, tem importância para madeira e para o adesivo, já que a resina não deve ter limites de pH fora da faixa de 2,5 a 11,0, pois pode resultar na degradação das fibras da madeira, e quando utilizando o pH muito baixo, pode provocar

espuma na mistura, prejudicando a colagem. Cada resina tem uma faixa para cura, em meio ácido ou alcalino”.

As resinas à base de formaldeído têm apresentado alguns pontos insatisfatórios devido à baixa resistência à ação da umidade e quando aquecida produz gás formaldeído, prejudicando o meio ambiente. Além da existência de uma tendência global em direção a produtos biodegradáveis, não poluentes e renováveis (FIORELLI *et al.*, 2012).

Uma vez imersa em água, a resina ureia formaldeído, designada para aplicações internas, não é durável sob condições de exposição ao ar (JULIANA; PARIDAH; ANWAR, 2012).

Uma alternativa para o uso de adesivos é a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, diferentemente das resinas a base de ureia, não gera problemas à saúde. Este adesivo também apresenta sua origem como uma vantagem, pois, é proveniente de fontes renováveis e é um material biodegradável.

3.4.1 Resina poliuretana bicomponente PU-Mamona em compósitos lignocelulósicos

A Resina poliuretana à base de óleo de mamona foi inicialmente desenvolvida para enxerto ósseo em medicina. Se constitui de uma resina denominada por Silva (2003) de PU-Mamona, formulado com base em óleo de mamona (poliol) e metileno difenildiisocianato (MDI). De acordo com Wechsler *et al.* (2013), a parte derivada do petróleo, o pré-polímero representa de 25% do adesivo, enquanto, a parte derivada do óleo de mamona (poliol) representa 75%, o que confere ao adesivo uma característica de baixa toxidez.

Os poliuretanos são uma ampla classe de polímeros, com fórmula estrutural $,-[OC - NH - (CH_2)_6 - NH - COO - (CH_2)_4 - O -]_n - H$ (ALMEIDA E AKCELRUD, 1999). Geralmente são obtidos por reações de poliadição, que apresentam como característica comum à presença de grupos uretano (-NHCO-O-) (SANCHES, 2016). Mostrando, portanto, grande possibilidade da formação de ponte de hidrogênio. A ligação de hidrogênio provoca uma influência notável sobre as propriedades macro e microscópicas dos poliuretanos (TENORIO-ALFONSO; SÁNCHEZ; FRANCO, 2019). Uma série de modos de vibração são suscetíveis a ligações de hidrogênio no poliuretano, no entanto, os mais significativos se encontram nas regiões de 3600-3100

e 1600-1750 referentes ao estiramento das ligações N-H e C=O respectivamente (GAO *et al.*, 2012).

O adesivo poliuretano, obtido do óleo extraído da mamona, que é uma planta facilmente encontrada, ou cultivada, na maioria das regiões do Brasil, pode ser empregado na produção de chapas de madeira aglomerada (PAES *et al.*, 2011).

A vantagem do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona é que se constitui de uma matéria-prima natural e renovável. Esta resina é classificada como impermeável, apresenta a característica de não ser agressiva ao meio ambiente e ao ser humano e é oriunda de tecnologia brasileira (DIAS, 2005).

Fiorelli *et al.* (2012), por meio de imagens eletrônicas de microscopia de varredura (MEV) observaram que o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona ocupa as lacunas entre as partículas, contribuindo para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Sartori *et al.* (2012) produziram painéis de madeira de reflorestamento e de partículas de bagaço de cana de açúcar com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona e afirmaram que esta resina se apresenta com um potencial adesivo para fabricação de painéis de partículas. Uma vez que, obtiveram em seus estudos módulo de elasticidade dentro do valor exigido pela norma ANSI 208.1:1999, módulo de ruptura e tração perpendicular superior ao valor estipulado.

De acordo com Gava *et al.* (2015) a resina de poliuretano à base de óleo de mamona é conhecida por ter menor afinidade pela água do que o adesivo UF tradicional, normalmente usados na fabricação de aglomerados esperando, portanto, menores valores de absorção de água por parte dos painéis feito com PU-Mamona.

Nogueira, Lahr e Giacon (2018) estudaram a viabilidade da produção de painéis de partículas aglomeradas utilizando-se o resíduo obtido após o beneficiamento do ouriço da Castanha-do-Brasil associado à resina poliuretana derivada do óleo da mamona. Primeiramente, foram estudados teores de resina poliuretana, derivada da mamona, inferior a 15%, no entanto, os painéis produzidos não apresentaram propriedades mecânicas significativas, dessa forma, os autores utilizaram teores de resina de 20%, 25% e 30%. O adesivo foi adicionado em proporção de 1:1, a prensagem a quente do material foi realizada em uma prensa hidráulica térmica na temperatura de 110°C, por 10 minutos a uma pressão de compactação de 15 MPa. Os autores concluíram que a adição de resina poliuretana à base do óleo da mamona mostrou-se eficiente como adesivo aglomerante, indicando que maiores porcentagens

de resina tendem a implicar em diminuição da absorção de água e variação dimensional dos painéis, assim como aumento da resistência mecânica.

Wechsler *et al.* (2013) avaliaram painéis aglomerados feitos a partir de partículas de casca de macadâmia coladas com resina derivada do óleo de mamona. Os autores produziram tratamentos de PU-Mamona: PWCO, composto por 80% de madeira de pinho e 20% PU-Mamona, em peso; e o tratamento PWUF formado de 90% de madeira de pinho e 10% de uréia-formaldeído, em peso. Foi utilizada a proporção 2:1, em peso, para a mistura poliol com isocianato da resina PU-Mamona, a prensagem dos painéis aglutinados com esta resina foi realizada a uma temperatura de 84°C, com pressão de 3,5 MPa por 18 minutos. A resina ureia-formaldeído foi preparada adicionando 9% de água a 91% de resina, em peso, e a prensagem dos painéis aglutinados com esta resina foi realizada a uma temperatura de 193°C, com pressão de 3,5 MPa por 2 minutos. Os resultados obtidos por Wechsler *et al.* (2013) nos ensaios de densidade, umidade, inchamento em espessura após 24 horas, tração perpendicular (TP), módulo de ruptura (MOR) e módulo de Elasticidade (MOE) encontram-se apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados dos painéis obtidos por Wechsler *et al.* (2013).

Propriedades	Unidade	Tratamentos			
		PWCO		PWUF	
		Média	CV(%)	Média	CV(%)
Densidade	g/cm ³	0,691	-	0,821	-
Umidade	%	5,9	1,7	6,2	5,6
Inchamento após 24 horas	%	12	9,1	31,8	2,5
Tração Perpendicular (TP)	MPa	0,99	-	0,46	-
Flexão Estática (MOR)	MPa	8,7	-	8,4	-
Módulo de Elasticidade (MOE)	GPa	0,93	-	1,21	-

Fonte: Wechsler *et al.* (2013).

Cravo, Sartori e Fiorelli (2017) estudaram painéis fabricados com partículas de sacos de cimento e revestidas com embalagens de longa duração colados com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona. A produção de painéis foi realizada com uma densidade nominal de 0,60 g/cm³, 12% de resina e 8% de umidade das partículas. A prensagem foi realizada com 5 MPa a 100 °C por 10 min. Os resultados obtidos pelos autores dos painéis de partículas de sacos de cimento encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos painéis de sacos de cimento obtidos por Cravo, Sartori e Fiorelli (2017).

Propriedades	Unidades	Média	CV (%)
Densidade	g/cm ³	0,60	-
Absorção de água	%	22	12,09
Inchamento após 24 horas	%	11	27,73
Módulo de Ruptura (MOR)	MPa	8,85	7,80
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	538	18,15

Fonte: Cravo, Sartori e Fiorelli (2017).

Os autores Cravo, Sartori e Fiorelli (2017) também estudaram painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar coladas com resina poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona. Os painéis foram fabricados com densidade nominal de 0,80 g/cm³ mantendo as partículas a 12% de umidade e tamanho de até 8 mm. Para a colagem foi utilizado 15% da resina em relação ao peso seco das partículas e a prensagem foi realizada com 5 MPa, a 100 °C por 10 min. Os resultados encontrados pelos autores dos painéis de partículas de bagaço de cana encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados dos painéis de partículas de bagaço de cana obtidos por Cravo, Sartori e Fiorelli(2017).

Propriedades	Unidades	Média	CV (%)
Densidade	g/cm ³	0,766	8,36
Absorção de água	%	43	18,60
Inchamento após 24 horas	%	18	16,67
Módulo de Ruptura (MOR)	MPa	25,68	11,41
Módulo de Elasticidade (MOE)	MPa	2265	6,31

Fonte: Cravo, Sartori e Fiorelli (2017).

No trabalho de Fiorelli *et al.* (2012), os pesquisadores estudaram o potencial uso da fibra de coco como material para a produção de painéis de partículas, com duas densidades diferentes (0,8g / cm³ e 1,0g / cm³), utilizando 10-15% de adesivo poliuretano à base de óleo de mamona e uréia formaldeído. Foram estudados três tratamentos: T1 (com densidade de 0,8 g/cm³ e aglutinados com poliuretano derivada do óleo de mamona), T2 (com densidade de 1 g/cm³ e aglutinados com poliuretano derivada do óleo de mamona) e T3 (com densidade de 1 g/cm³ e aglutinados com ureia formaldeído). Os painéis do estudo foram produzidos com pressão abaixo de 50 kg / cm² e temperatura de até 100–140 °C por 10 min.

A tabela 12 mostra a relação das propriedades físico-mecânicas dos tratamentos. Os autores concluíram que os tratamentos de densidade diferentes não apresentam diferença estatística significativa ($p < 0,05$) para as propriedades. Porém os tratamentos T2 e T3, de mesma densidade e resinas diferentes apresentam uma diferença significativa ($p < 0,05$) para todas as variáveis estudadas, sendo o adesivo de poliuretano de óleo de mamona um aglutinante mais eficiente quando comparado ao adesivo de ureia-formaldeído.

Tabela 12 - Resultados dos estudos de Fiorelli *et al.* (2012).

Propriedades	Un.	Tratamento					
		T1		T2		T3	
		Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)
Absorção	%	36,59	11,09	22,38	26,37	43,43	9,59
Inchamento após 24 horas	%	15,30	19,08	19,67	29,74	32,08	11,82
Tração Perpendicular (TP)	MPa	1,80	19,11	2,07	27,94	1,04	62,56
Flexão Estática (MOR)	MPa	17,94	19,04	17,92	9,20	15,83	14,75
Módulo de Elasticidade (MOE)	GPa	1,405	53,01	1,396	11,75	2,041	18,91

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

De acordo com Fiorelli *et al.* (2012) o painel de partículas com menor densidade (T1) apresentou maior taxa de absorção de água quando comparado ao de maior densidade (T2), mesmo ambos utilizando a resina poliuretana derivada do óleo de mamona. Os autores verificaram que a absorção de água para os painéis produzidos com ureia formaldeído (T3) foi superior à dos demais tratamentos, e justificaram esta observação pela microestrutura formada entre as partículas e o adesivo de óleo de mamona. A mesma tendência foi seguida para a propriedade de inchamento após 24 horas, os painéis aglutinados com ureia formaldeído apresentaram maiores valores desta propriedade em comparação a resina de óleo de mamona. De acordo com os autores este resultado tem correlação com a dispersão e expansão do adesivo no processo de cura.

Uma análise de microestrutura MEV foi realizada pelos autores nos tratamentos T2 e T3 e mostrou que no tratamento T2 há uma dispersão homogênea da resina entre as partículas enquanto no T3 esta difusão não ocorreu de forma regular, o que pode ter prejudicado a adesão entre as partículas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão descritos os materiais e os métodos utilizados para a produção dos painéis de partículas de madeira aglomerada, bem como os equipamentos e os ensaios realizados na respectiva caracterização físico-mecânica.

4.1 Materiais

4.1.1 Seringueira

A seringueira utilizada nos estudos exploratórios (Figura 5) foi doada pela Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE da Universidade Estadual Paulista de Ilha Solteira. Esta árvore é o clone Rubber Research Institute of Malaysia (RRIM) 600 que foi plantada em 1983 e enxertada em 1985 na porção da fazenda destinada à produção vegetal que tem área total: 352,81 ha e está localizada no município de Selvíria/MS. As toras de seringueira para continuação dos estudos da segunda etapa foram obtidas por doação de fazendas do município de Mirassol-SP e também faziam parte da classificação clone Rubber Research Institute of Malaysia (RRIM) 600.

Figura 5 –Plantio de árvores de Seringueira utilizada para confecção dos painéis.



Fonte: Acervo da autora.

As Figura 6a e 6b, ilustram aspectos gerais das toras oriundas das Seringueiras e das partículas utilizadas para produção dos painéis.

Figura 6 –Toras e partículas de Seringueira.



(a) Toras de seringueira descascadas.

(b) Partículas de seringueira.

Fonte: Acervo da autora.

4.1.2 Teca

A árvore de Teca utilizada em toda a pesquisa (Figura 7) foi coletada do viveiro de mudas da Prefeitura Municipal de Ilha Solteira-SP.

Figura 7 – Árvore de Teca utilizada para confecção dos painéis.



Fonte: Acervo da autora.

As Figuras 8a e 8b ilustram as toras e as partículas de teca utilizadas para confecção dos painéis. Ressalta-se que para obtenção das partículas foi retirada a casca das toras.

Figura 8– Toras e Partículas de Teca.



(a) Toras de Teca com casca

(b) Partículas de Teca

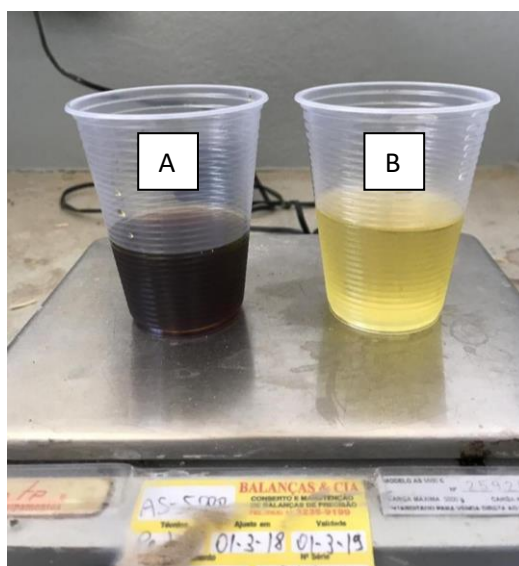
Fonte: Acervo da autora.

4.1.3 Resina Poliuretana derivado de óleo de mamona (PU-Mamona)

A PU-Mamona foi utilizada para aglutinar as partículas do painel. Essa resina é um poliuretano bicomponente vegetal (proveniente do óleo de mamona) e foi obtido por meio de doação da empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, com sede em Aguaí-SP e comercializada com o nome AGT 1315.

De acordo com a descrição da empresa, esse produto constitui-se de dois componentes como ilustrado na Figura 9, sendo o componente [A] o pré-polímero composto por metileno difenil diisocianato (MDI) derivado do petróleo (substância marrom escuro) e o componente [B] o polioli, oriundo do óleo da mamona (substância amarelada). No presente trabalho foi utilizada a proporção de 1:1 dos dois componentes. A IMPERVEG® descreve na ficha técnica que após misturar o pré-polímero e o polioli, o tempo de vida útil da mistura (potlife) gira em torno de 15 minutos, esse é o tempo que a resina entra no ponto de gel e dificulta o manuseio do material, gerando consequentemente perdas.

Figura 9 - Componentes da resina PU-Mamona.



Fonte: Acervo da autora.

De acordo com a IMPERVEG®, a resina apresenta consistência fluída, cor âmbar após cura, é isento de solventes, ou seja, não libera vapores tóxicos, possui resistência ao calor até 210°C, demora de 60 a 90 minutos para secagem (variando com a temperatura ambiente) e tem tempo de cura de 24 horas. Quanto ao rendimento do adesivo, a empresa especifica que varia de 10 a 50 % em relação à massa do material a ser utilizado, dependendo das características e resistências mecânicas que se deseja para o produto final.

4.2 Procedimentos Metodológicos

A produção dos painéis e o desenvolvimento da pesquisa foram realizados no Campus I da UNESP de Ilha Solteira, especificamente no Laboratório Central de Engenharia Civil, pertencente ao Departamento de Engenharia Civil (DEC), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Universidade Estadual Paulista (UNESP).

4.2.1 Definição dos tratamentos

O desenvolvimento dos estudos para produção e avaliação dos painéis foi baseado em duas etapas para produção dos painéis de acordo com tratamentos entre misturas de partículas de Seringueira, Teca e PU-Mamona. A primeira etapa foi

denominada de estudos exploratórios, onde se propôs o maior número de tratamentos para confecção dos painéis e os resultados obtidos, foram apresentados na qualificação deste estudo. A segunda etapa se constituiu da produção e avaliação de painéis do tratamento com 70% Teca e 30% Seringueira, e com os painéis do tratamento com 50% de Seringueira e 50% de Teca.

4.2.1.1 Primeira etapa - Tratamentos propostos para produção dos painéis

Foram definidos dez tratamentos para produzir os painéis experimentais da primeira etapa que aparecem relacionados na Tabela 13. Os tratamentos apresentam diferentes porcentagens, em massa, entre as misturas de partículas de Seringueira e Teca, bem como variação da porcentagem da resina poliuretana de 5 e 10 % em relação à massa de partículas.

Tabela 13 – Tratamentos propostos para os painéis exploratórios.

Tratamentos	Seringueira (%)	Teca (%)	PU-Mamona (%)
T_{100S}^{10PU}	100	0	10
T_{70S30T}^{10PU}	70	30	10
T_{50S50T}^{10PU}	50	50	10
T_{30S70T}^{10PU}	30	70	10
T_{100T}^{10PU}	0	100	10
T_{100S}^{5PU}	100	0	5
T_{70S30T}^{5PU}	70	30	5
T_{50S50T}^{5PU}	50	50	5
T_{30S70T}^{5PU}	30	70	5
T_{100T}^{5PU}	0	100	5

Fonte: Acervo da autora

Foi definido a utilização de 5% e 10% de resina PU-Mamona para produção dos painéis, calculada em relação à massa seca das partículas. Esses percentuais propostos inicialmente visaram avaliar a quantidade de resina PU-Mamona que possa conferir melhores propriedades físicas e mecânicas para os painéis, considerando-se também a possibilidade de interação entre a PU-Mamona e o látex da seringueira. Ressalta-se que as indústrias de produção de painéis utilizam 10% de resina ureia formaldeído, pois, esse teor propicia aos painéis qualidades de resistências físicas e mecânicas satisfatórias sem encarecer demasiadamente o produto.

Dentro deste contexto vale lembrar que o custo da resina é um fator importante na fabricação dos painéis, pois, dentre os insumos utilizados para sua produção, a resina é o que apresenta o maior custo, consequentemente, os tratamentos com 5% de resina, se oferecer aos painéis qualidade e propriedades adequadas, certamente representará uma excelente alternativa, tanto sob os aspectos relacionados aos usos dos painéis, principalmente sob o ponto de vista de sua resistência a umidade, inchamento e absorção, bem como, um fator importante para diminuir o custo final para comercialização do produto.

4.2.1.2 Segunda etapa - Tratamentos propostos para produção dos painéis

Com base nas análises dos resultados determinados para os painéis produzidos com os estudos exploratórios, foram produzidos novos painéis de partículas considerando-se ajustes de umidade e densidade nominais para os painéis, com o objetivo de melhorar suas propriedades.

Adotou-se o teor de umidade das partículas de aproximadamente 10% e a densidade nominal de $0,65 \text{ g/cm}^3$, pois, com base nos estudos exploratórios, verificou-se que as densidades aparentes dos painéis se apresentaram com valores médios superiores ao máximo estipulado pela norma brasileira, consequentemente, optou-se por definir um valor de densidade nominal para produção dos painéis, dentro do intervalo proposto pelo documento normativo brasileiro.

Os novos painéis foram produzidos para os tratamentos com 70% de Teca e 30% de Seringueira (em massa) e com 50% de Teca e 50% de Seringueira (em massa), ambos aglutinados com 5 e 10% de resina, ou seja, 3 painéis para cada tratamento totalizando 12 painéis. O tratamento 70% Teca com 30% seringueira, foi escolhido por apresentar os melhores resultados físicos e mecânicos para os painéis avaliados. Quanto ao tratamento com 50% Teca e 50% Seringueira, foi escolhido com base nos melhores resultados de suas propriedades e por definirem proporções significativas para ambas as espécies estudadas.

4.2.2 Preparação das partículas

Inicialmente as partículas de Teca e Seringueira foram preparadas utilizando-se uma plaina desgrossadeira. Nas Figuras 10a e 10b estão ilustrados os momentos do processamento e os aspectos gerais dos cavacos após processamento.

Figura 10 – Produção dos cavacos de Seringueira e Teca.



Fonte: Acervo da autora.

Em seguida os cavacos obtidos foram processados em moinho de facas para obtenção de partículas com comprimento de 2 a 10mm. A Figura 11 ilustra o moinho de facas, localizado na Fazenda de Ensino e pesquisa da FEIS, sendo utilizado no momento da produção de partículas de 2 a 10mm.

Figura 11 – Utilização do moinho de facas para produção de partículas.



Fonte: Acervo da autora.

4.2.3 Classificação granulométrica das partículas

Para a classificação granulométrica das partículas foi utilizado o agitador de peneiras ilustrado na Figura 12 com peneiras 1"; 3/4"; 1/2"; 3/8"; 1/4"; N°4 e N°8, e aberturas de 25,4; 19,05; 12,5; 9,52; 6,36; 4,36 e 2,36 (mm) respectivamente. Para obtenção das partículas na faixa de 2mm a 6 mm, o processo para peneiramento do material foi realizado depositando-se vários volumes no peneirador, agitando-os por 7 minutos.

De acordo com a literatura consultada, partículas com dimensões entre 2 e 6 milímetros garantem um melhor resultado final do painel, conseqüentemente, foram selecionadas as partículas retidas nas peneiras N°4 e N°8, que retém partículas com tamanhos entre 6,36 mm e 2,36 mm, respectivamente.

Figura 12 – Peneirador elétrico utilizado para separação das partículas em função de seus comprimentos.



Fonte: Acervo da autora.

4.2.4 Ensaio para determinação da composição granulométrica

Após separação das partículas de um determinado volume, executou-se o ensaio para determinação da composição granulométrica das partículas, considerando-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e adaptando-se o que foi necessário.

Para realização do ensaio utilizou-se o conjunto de peneiras do equipamento ilustrado na Figura 13, na seguinte ordem decrescente de abertura das malhas, 1/4"; N°4; N°8; N°16; N°30; N°50 e N°100 com aberturas respectivamente de 6,36; 4,36; 2,36; 1,19; 0,595; 0,297; 0,149; 0,075 (mm), respectivamente.

Figura 13 –Determinação da composição granulométrica das partículas.



Fonte: Acervo da autora.

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) a massa de uma amostra deve ser no mínimo de 300 gramas, porém como as partículas de madeira possuem geometria e densidade diferente dos agregados de origem rochosa, foi necessário adaptar a quantidade da amostra ensaiada.

A massa utilizada foi 35 gramas para cada amostra, essa quantidade foi determinada com base no volume máximo para que o ensaio fosse realizado corretamente, ou seja, de forma que todas as partículas com uma dimensão menor que a malha de uma determinada peneira consiga passar por esta. Com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003) o acúmulo de material sobre uma peneira impede o igual acesso de todos os grãos à tela, durante sua agitação.

A norma recomenda o ensaio de duas amostras, porém como se utilizou uma massa menor que a mínima exigida, foram ensaiadas três amostras.

Inicialmente, para realização do ensaio, secou-se a amostra em estufa, e determinou-se sua massa; encaixaram-se as peneiras e o fundo, previamente limpos e em seguida realizou-se a agitação mecânica do conjunto com intensidade de vibração no nível 4 por 15 minutos; após esse tempo, retirou-se do conjunto, a peneira superior e agitou-se manualmente até que a massa de material passante pela peneira fosse inferior a 1% da massa do material retido (Figura 14a) em seguida, pesou-se o material retido (material do lado interno) na peneira; adicionou-se o material passante (material que passou pela agitação manual e o que ficou retido pelo lado externo) na peneira da sequência (Figura 14b), esse procedimento foi realizado em todas as peneiras e o somatório de massa retida em todas as peneiras e fundo não pode ser

menor que 0,3% da massa da amostra ensaiada. Esse ensaio foi repetido para as três amostras das cinco misturas.

Figura 14 –Etapas do ensaio de determinação granulométrica.



(a) Agitação manual da peneira.

(b) Incorporação do material retido.

Fonte: Acervo da autora.

De posse das massas retidas em cada peneira de cada amostra, calculou-se a porcentagem retida, em massa, em cada peneira; as porcentagens médias, retida e acumulada, em cada peneira; bem como, o módulo de finura, com aproximação de 0,01.

4.2.5 Regularização da umidade

Após classificação das partículas, foram expostas ao sol para ajustar a umidade na faixa de 10%, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 –Secagem das partículas.



Fonte: Acervo da autora.

Após secagem ao ar livre das partículas, calculou-se o teor de umidade para a faixa de 10% a 12% que é a faixa de umidade que vem sendo utilizada para o emprego da resina PU-Mamona.

Realizou-se o preparo dos tratamentos para produção dos painéis e calculou-se o teor de umidade das partículas de cada tratamento, o cálculo da umidade das partículas foi realizado utilizando a NBR 9939 (ABNT, 1987). Com base no referido documento normativo, é recomendado realizar a pesagem de três amostras (Figura 16) que corresponderá a massa inicial ou massa úmida; secar as amostras em estufa; após um período de tempo na estufa, determinar a massa da amostra em intervalos sucessivos de pelo menos 2 h para obter a massa final.

Figura 16 - Ilustração das amostras para determinação do teor de umidade das partículas de cada um dos tratamentos.



Fonte – Acervo da autora

De acordo com o documento normativo, a massa seca (massa final) é obtida quando a diferença entre as duas pesagens sucessivas não indicar mais que 0,1% de perda de massa da amostra. Por fim o teor de umidade é determinado pela média dos teores de umidades das amostras que é calculado pela Equação 1:

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U é o teor umidade das partículas (%);

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

M_s é a massa seca das partículas(g).

Considerando-se as características climáticas de Ilha Solteira (clima quente e seco), a secagem das partículas ao ar livre, possibilitou a obtenção de umidades abaixo de 10%, sendo necessário o ajuste dessa umidade, com adição, para obtenção de partículas na faixa de 10% a 12% de umidade. O cálculo para adição de água foi realizado utilizando-se a Equação 2, empregada para determinação da umidade de solos.

$$MA_n = \frac{MP_i}{1 + U_i} \times U_d \quad (2)$$

Onde:

MA_n é a massa de água (g) necessária para atingir a umidade desejada;

MP_i é a massa das partículas (g) na umidade inicial;

U_i é o teor umidade inicial das partículas; e

U_d é o teor umidade desejado das partículas.

Após determinar a quantidade necessária de água a ser acrescentada nas misturas, as partículas secas foram colocadas em sacos plásticos e adicionou-se água com um borrifador. Depois de uma hora verificou-se novamente o teor de umidade, esse procedimento foi repetido até que as partículas atingissem a umidade desejada.

4.2.6 Cálculo da massa de partículas dos painéis

Para cálculo da massa de partículas necessária para produção dos painéis utilizou-se a Equação 3, em função da densidade nominal e volume do painel.

$$D = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Onde:

D é a densidade nominal dos painéis (g.cm^{-3});

M é a massa de partículas necessária para confecção dos painéis (g);

e

V é o volume painéis (cm^3).

Nos estudos exploratórios foi adotada densidade nominal de $0,8\text{g.cm}^{-3}$ com base nos estudos de Sugahara (2018) e Oliveira (2019) que utilizaram a mesma resina. A área do painel foi limitada à 35x35 cm devido às dimensões da formadora de colchão

e da prensa hidráulica. A espessura definida foi de 1,5 cm. Portanto o volume do painel utilizado para o cálculo foi de 1837,5 cm³ (35x35x1,5). E a massa utilizada para cada painel da primeira fase foi de 1470 gramas de partículas.

Para os painéis da segunda fase, foi adotada densidade nominal de 0,65 g/cm³, sendo assim a massa de partículas utilizada foi 1194,38 gramas em cada painel.

Depois da definição de massa e pesagem das partículas, estas foram separadas de acordo com as quantidades estabelecidas em cada tratamento devido a porcentagem de cada tipo de madeira, embaladas e identificadas corretamente.

4.2.7 Produção dos painéis

A resina poliuretana bicomponente derivada de óleo de mamona (PU-Mamona) foi utilizada como aglutinante na proporção de 5% e 10% em relação à massa das partículas que se apresentavam com umidade entre 10% e 12%.

O processo de homogeneização da resina PU-Mamona foi realizado adicionando-se na mistura, primeiramente o poliol e, em seguida o pré-polímero. Segundo, Sugahara (2018) este procedimento retarda a cura do adesivo garantindo um melhor encapsulamento nas partículas e uma boa homogeneização do adesivo à mistura, evitando concentrações de adesivo em regiões pontuais do painel.

O processo de homogeneização da resina PU-Mamona às partículas iniciou-se manualmente com a adição poliol, em seguida, a mistura foi homogeneizada utilizando-se uma betoneira durante um período de 5 minutos, decorrido esse período, adicionou-se manualmente o pré-polímero e, novamente, homogeneizou-se a mistura utilizando-se a betoneira durante um período de 5 minutos. As Figuras 17a e 17b, ilustram as etapas do processo de homogeneização da mistura.

Figura 17 – Adição e homogeneização da resina PU-Mamona às partículas.



(a) Adição e homogeneização manual dos componentes da resina às partículas.

(b) Homogeneização da mistura utilizando-se betoneira.

Fonte: Acervo da autora.

Após realização da homogeneização da mistura, iniciou-se a preparação do colchão de partículas, forrando-se com papel antiaderente a base da formadora de colchão para em seguida ser depositado em seu interior as partículas previamente coladas. A Figura 18a e 18b ilustram as etapas para preparação do colchão de partículas.

Figura 18– Preparação do colchão de partículas.



(a) Deposição das partículas na formadora de colchão.

(b) Pré-prensagem.

Fonte: Acervo da autora.

Depois de preparar o colchão de partículas, o mesmo foi levado para a prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão para produção dos painéis, conforme ilustrado nas Figuras 19a, 19b e 19c.

Figura 19 – Prensagem do colchão de partículas para produção dos painéis.



(a) Colchão de partículas



(b) Papel alumínio na superfície superior.



(c) Filme de PVC na superfície superior

Fonte: Acervo da autora.

Para produção dos painéis, empregou-se força de 61,25 tf, o equivalente a uma pressão de 50kgf/cm² em função da área do painel e, temperatura de 100°C, durante 10 minutos. O procedimento foi realizado com a prensagem do painel em duas etapas, inicialmente durante 5 minutos, com alívio de pressão por 30 segundos, para evitar concentração de gases e consequentemente à formação de bolhas no interior dos painéis e em seguida, prensagem por mais 5 minutos para finalização do processo de prensagem. As Figuras 20a, 20b e 20c, ilustram a prensa hidráulica e os dispositivos para produção do painel.

Figura 20 – Prensa hidráulica com controle de temperatura.



(a) Prensa hidráulica com dispositivo para prensagem dos painéis

(b) Painel de partículas após prensagem

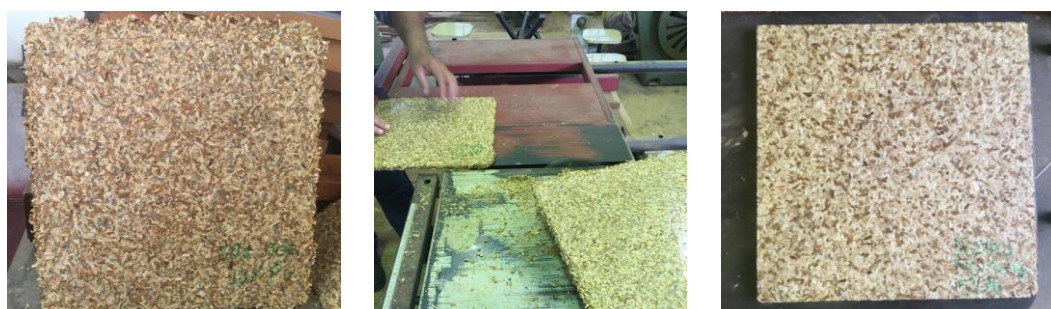
(c) Quadro de controle de temperatura

Fonte: Acervo da autora.

Conforme descrito anteriormente, o desenvolvimento do estudo foi realizado em duas etapas e foram produzidos painéis nas dimensões de 35 x 35 x 1,5 cm.

As Figuras 21a, 21b e 21c ilustram um painel depois de decorridas 72h de sua produção, sendo esquadrejado e o painel finalizado.

Figura 21: Painel de Partículas



(a) Aspectos gerais de um painel após prensagem.

(b) Esquadrejamento para remoção das bordas irregulares.

(c) Painel esquadrejado pronto para preparação dos cps

Fonte: Acervo da autora.

Para realização dos ensaios foram retirados de cada painel corpos de prova (cps) com as dimensões de 35x50x15mm para avaliação da Resistência à Flexão Estática e, cps nas dimensões 50x50x15mm para cada um dos demais ensaios (tração perpendicular, densidade, umidade e inchamento em espessura).

Conforme descrito anteriormente, os estudos exploratórios objetivaram verificar tendências, tanto com relação à produção dos painéis como em relação as propriedades físicas e mecânicas.

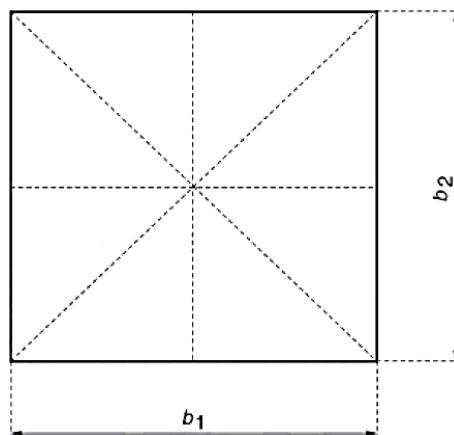
4.2.8 Realização dos ensaios físicos

Foram realizados os ensaios de Densidade (D), Teor de umidade (U) e Inchamento após 24h (I) com base na NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

4.2.8.1 Densidade (D)

Como especificado pelo documento normativo, determinou-se individualmente a massa de cada cp utilizando uma balança com precisão de 0,01g e traçaram-se as diagonais de cada cp como esquematizado na Figura 22.

Figura 22 – Pontos de medição no cp.



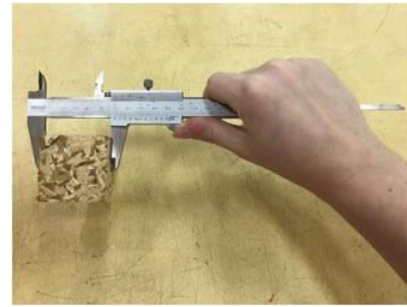
Fonte: ABNT (2018).

Com base nas marcações realizadas (Figura 22), mediu-se a espessura no ponto de intersecção das diagonais de cada cp com auxílio de um micrômetro digital e, as larguras b_1 e b_2 (Figura 22) utilizando-se um paquímetro. A Figura 23 ilustra as aferições da espessura e largura do cp.

Figura 23 – Determinação das dimensões dos cps.



(a) Aferição de espessura



(b) Aferição da largura

Fonte: Acervo da autora.

Baseado nas dimensões aferidas calcularam-se os volumes dos cps conforme a Equação 4. Posteriormente com os valores de massa e volume encontrados, calculou-se a densidade aparente de cada amostra utilizando a Equação 5, com precisão de 0,001 g/cm³ e a densidade média do tratamento. Finalmente, com auxílio da Equação 6 determinou-se a variação percentual da densidade de cada cp em relação à densidade média.

$$V = b_1 \times b_2 \times e \quad (4)$$

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

$$D_{\%} = \frac{(D - D_m)}{D_m} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

V é o volume do cp (cm³);

b_1 e b_2 são as dimensões do cp (cm);

e é a espessura do cp (cm);

D é a densidade do cp (g.cm⁻³);

M é a massa do cp (g);

$D_{\%}$ é a variação percentual da densidade (%); e

D_m é a densidade média dos cps de um tratamento (g.cm⁻³).

Em virtude de não ser destrutivo o ensaio de densidade e não alterar as propriedades e característica do painel, os mesmos cps do ensaio de densidade foram utilizados no ensaio de tração perpendicular.

4.2.8.2 Teor de umidade (U)

Utilizando-se uma balança com resolução 0,01g determinou-se a massa inicial (massa úmida) de cada cp como ilustra a Figura 24a, em seguida levaram-se as amostras para secagem em estufa a temperatura $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ (Figura 24b), até a obtenção de massa constante. A massa constante (massa seca) foi obtida quando o resultado de duas pesagens subsequentes, em um intervalo mínimo de 6 horas, não apresentou diferença superior à 0,1%.

Figura 24 – Equipamentos utilizados para pesagem e secagem dos cps.



(a) Balança digital para aferição da massa dos cps.



(b) Estufa com regulagem de temperatura para secagem dos cps.

Fonte: Acervo da autora.

Com base nas massas (úmida e seca) obtidas com as pesagens, calculou-se o teor de umidade utilizando-se a Equação 7.

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

U é o teor umidade dos cps (%);

M_u é a massa úmida dos cps (g); e

M_s é a massa seca dos cps(g).

4.2.8.3 Inchamento após 24h (I)

Para determinar o inchamento em espessura após 24 horas, foram utilizados cps com dimensões de 50 x 50 mm. Inicialmente, aferiu-se a espessura (E_0) dos cps no ponto de intersecção das diagonais com auxílio de um micrômetro digital (Figura 23).

Em seguida, as amostras foram submersas em água deionizada, utilizando-se um recipiente de PVC e telas metálicas com apoio de pesos (garantindo que os cps permanecessem submersos com o nível de água de 25 mm, aproximadamente, acima da superfície superior do cp, conforme ilustrado na Figura 25). Após 24 horas aferiu-se novamente a espessura (E_1).

Figura 25 –Ensaio de inchamento após 24h.



Fonte: Acervo da autora.

Os resultados de inchamento após 24h, em porcentagem, foram calculados com o auxílio da Equação 8, com precisão de 0,1%.

$$I = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

I é o inchamento em espessura do cp (%);

E_1 é a espessura do cp após o período de imersão (mm); e

E_0 é a espessura do cp antes da imersão (mm).

4.2.9 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

Medidas de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier foram realizadas utilizando um espectrofotômetro NEXUS 670 da empresa Nicolet Instrument Corporation (Figura 26) com o objetivo de verificar a ocorrência de ligações e formação de pontes de hidrogênio. Para isso, as amostras foram pulverizadas e maceradas com

Brometo de potássio (KBr) nas proporções 1:200 mg e transformadas em pastilhas. Os espectros foram obtidos na faixa de comprimento de onda de 4000 a 400 cm^{-1} com resolução de 4 cm^{-1} . Duas medidas foram realizadas para cada composição, em diferentes amostras. Desta forma, as discussões foram feitas levando-se em conta o comportamento médio obtido a partir do respectivo grupo de medidas.

As Figuras 27a, 27b e 27c, ilustram, respectivamente, o processo de maceração, equipamento para formação das pastilhas, e as pastilhas.

Figura 26 – Espectrofotômetro NEXUS 670.



Fonte: Acervo da autora.

Figura 27 – Procedimento para formação das pastilhas



a) Maceração KBr e amostras.



b) Equipamento para formar pastilhas.



c) Pastilhas

Fonte: Acervo da autora.

4.2.10 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para realizar as análises morfológicas verificando o espalhamento da resina PU-Mamona, o recobrimento das partículas e a superfície fraturada. A morfologia de todas as amostras foi analisada na região de fratura, por essa razão, as amostras foram fraturadas em nitrogênio líquido (Figura 28).

Figura 28 – Processo de fratura em nitrogênio líquido.



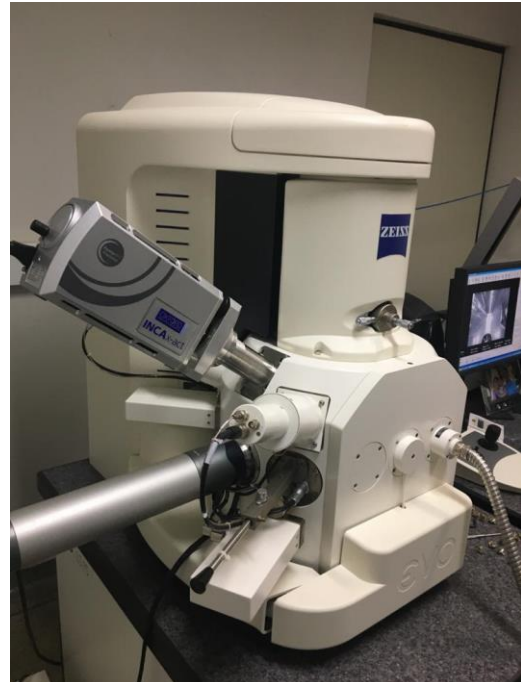
Fonte: Acervo da autora.

As amostras fraturadas foram fixadas em porta amostra Stub, específico para a medida, para a fixação utilizou-se fita dupla face de carbono, garantindo que a área de clivagem margeasse rente à lateral do Stub. As amostras foram metalizadas com uma fina camada de ouro utilizando-se a metalizadora Quarum, modelo Q150TE e colocadas no equipamento da ZEISS modelo EVO LS15, acoplado com EDS – OXFORD Instruments, modelo INCAX-act, para realização do ensaio de MEV. As figuras 29a e 29b ilustram, respectivamente, a metalizadora Quarum e o equipamento da ZEISS.

Figura 29 – Equipamentos para realização do ensaio de MEV.



(a) Metalizadora Quorum



(b) Aparelho para ensaio MEV

Fonte: Acervo da autora.

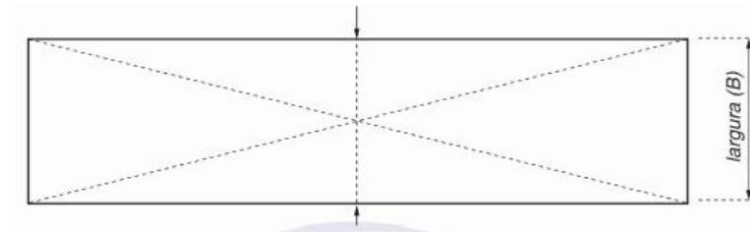
4.2.11 Ensaios mecânicos

Com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas dos painéis, foram realizados os ensaios para determinação do Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE) e Resistência à Tração Perpendicular ou Adesão Interna (TP) com base no documento normativo NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Para execução dos ensaios mecânicos utilizou-se a máquina universal de ensaios EMIC GR048, com capacidade máxima de 300kN.

4.2.11.1 Ensaio de Flexão

A Figura 30 ilustra um desenho esquemático de um cp para o referido ensaio.

Figura 30 – Desenho do cp para o ensaio de Flexão Estática com o esquema para aferição de suas dimensões.



(a) Desenho esquemático do cp segundo a NBR14810-2 (ABNT, 2018).



(b) Cp para ensaio de Flexão Estática.

Fonte: (ABNT, 2013).

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios com velocidade constante de tal forma que garantisse a ruptura do cp no intervalo de (60 ± 30) segundos. A Figura 31 ilustra o cp disposto no aparato, no momento da realização do ensaio.

Figura 31 – Aparato para realização do ensaio de Flexão Estática.



Fonte: Acervo da autora.

4.2.11.1.1 Módulo de resistência à flexão estática (MOR)

Foi determinado com base no valor da força de ruptura lido no indicador de cargas da máquina universal de ensaios, no cp com as dimensões aferidas e utilizando-se a Equação 9.

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2} \quad (9)$$

Onde:

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

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

D é a distância entre apoios do aparelho (mm);

B é a largura do cp (mm); e

E é a espessura média tomada em três pontos do cp (mm).

4.2.11.1.2 Módulo de elasticidade (MOE)

Para calcular o módulo de elasticidade (MOE) utilizou-se a Equação 10 juntamente com o resultado (a carga no limite proporcional registrada no indicador de cargas da máquina universal de ensaios) obtido no ensaio de flexão estática e as dimensões aferidas.

$$MOE = \frac{P1 \times D^3}{d \times 4 \times B \times E^3} \quad (10)$$

Onde:

MOE é o módulo de elasticidade (N/mm²);

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

D é a distância entre os apoios do aparelho (mm);

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

B é a largura do cp (mm); e

E é a espessura do cp (mm).

4.2.11.2 Resistência à tração perpendicular (TP).

A Resistência à Tração Perpendicular (IB) ou Ligação Interna (AI) é definida como a propriedade mecânica que mostra resistência à tração entre uma matéria-prima e um adesivo (ABDUL KHALIL *et al.* 2010).

Para a determinação da Resistência à Tração Perpendicular, foram utilizados os cps com dimensões de 50 x 50 x 15 mm empregados no ensaio de densidade.

O procedimento determinante, para perfeita execução deste ensaio é a preparação dos suportes metálicos e cps bem como a colagem entre eles.

A preparação dos cps foi realizada primeiramente com a regularização na lixadeira deixando ambas as faces dos cps homogêneas e retilíneas. Posteriormente lixaram-se as superfícies no CP em uma superfície rugosa (na presente pesquisa os CPs foram lixados no chão rugoso) para garantir que ambas as superfícies do cp estivessem ásperas para melhorar a eficiência da cola utilizada. Por fim, realizou-se a limpeza dos cps, com ar comprimido para garantir que a superfície do cp estivesse isenta de pó e prejudicasse a adesão entre madeira e o suporte metálico para realização do ensaio.

A limpeza dos suportes metálicos foi realizada com os equipamentos ilustrados na Figura 32 e limpando-se com Thinner suas superfícies para garantir a remoção do adesivo utilizado para fixar o cp ao suporte metálico.

Figura 32 – Limpeza dos suportes metálicos.



(a) Limpeza inicial.

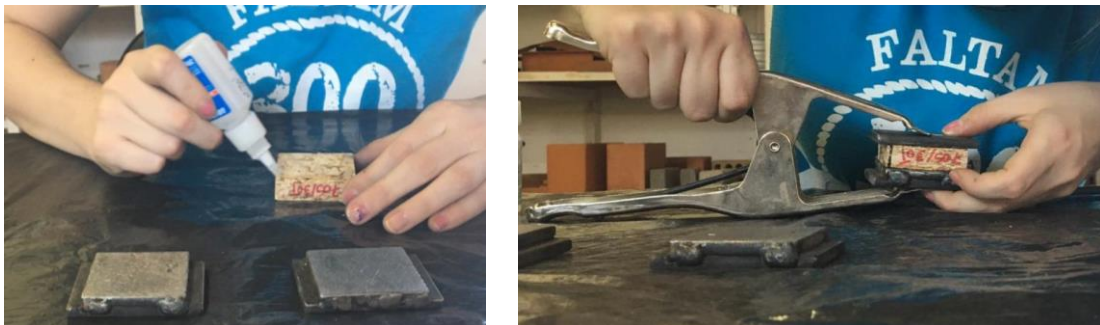


(b) Escova de aço rotativa.

Fonte: Acervo da autora.

A fixação dos cps foi realizada utilizando-se o adesivo instantâneo Loctite 496 que possui secagem inicial em 35seg e cura completa em 24h. A aplicação do adesivo foi realizada apenas no cp e procurando manter uma homogeneidade sem excesso e falta do adesivo, conforme ilustra a Figura 33a. Para garantir uma boa adesão o conjunto suporte metálico e cp foram comprimidos com pinças, como ilustrado na Figura 33b durante um período de 24 horas até a completa cura do adesivo.

Figura 33 – Colagem dos suportes metálicos nos cps de madeira.



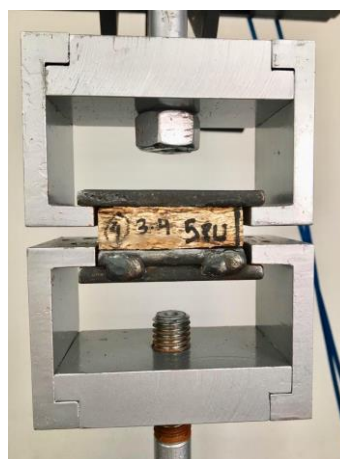
(a) Aplicação da cola nos CPs.

(b) Colocação das pinças

Fonte: Acervo da autora.

Os ensaios para avaliação da Resistência à Tração Perpendicular foram realizados conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Ilustração do ensaio para avaliação da Resistência à Tração Perpendicular.



Fonte: Acervo da autora.

Com base na carga de ruptura obtida no ensaio, e as dimensões dos cps, calculou-se a resistência de tração perpendicular utilizando as Equações 11 e 12.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (11)$$

$$S = b_1 \times b_2 \quad (12)$$

Onde:

TP é a resistência à tração perpendicular (N/mm²);

P é a carga na ruptura (N);

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

b_1 e b_2 são as dimensões do cp (mm).

4.2.12 Análise estatística

A análise estatística foi realizada para as avaliações da segunda etapa. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, sendo o primeiro fator a madeira e o segundo a resina. Levando-se em conta a Densidade, Teor de Umidade, Inchamento, Módulo de Ruptura, Módulo de Elasticidade e Tração Perpendicular.

Utilizando o software Sisvar®, a hipótese da normalidade foi testada com base no teste de Tukey, após realizar a análise de variância (ANOVA) aplicando-se o teste F a 5% de probabilidade para a identificação das diferenças dos fatores determinados. Quando detectadas diferenças significativas, para a comparação das médias, também foi utilizado o teste de Tukey com nível de significância de 5%, para ambos os fatores (madeira e resina) e a interação entre eles. As médias que apresentaram diferença significativa foram apresentadas como a e b, indicando que a média com indicador a foi diferente da média com indicador b.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA PRIMEIRA ETAPA (ESTUDOS EXPLORATÓRIOS)

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no preparo das partículas e nos ensaios físicos e mecânicos dos painéis dos dez tratamentos dos estudos exploratórios. A análise dos resultados foi realizada com base nos valores mínimos exigidos pela NBR14810-2 (ABNT, 2018) e de acordo com a literatura de referência. No presente capítulo também são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de Espectroscopia de infravermelho (FTIR) e Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

5.1 Avaliação das propriedades das partículas

5.1.1 Teor de umidade

Os resultados dos Teores de Umidade das partículas de cada tratamento estão representados na Tabela 14.

Tabela 14– Teor de umidade das partículas.

Tratamento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	CV (%)
100% Seringueira	11,86	11,73	11,96	11,85	0,95
70% Seringueira 30% Teca	10,36	10,49	10,69	10,51	1,61
50% Seringueira 50% Teca	12,20	11,80	12,10	12,00	1,69
30% Seringueira 70% Teca	11,60	11,49	11,60	11,56	0,57
100% Teca	11,25	10,95	11,32	11,17	1,79

Fonte: Acervo da autora.

Como podem ser observados na Tabela 14, os teores de umidade das partículas de todos os tratamentos apresentaram-se entre 10% e 12%, conforme proposto pela metodologia aplicada para produção dos painéis.

5.1.2 Composição Granulométrica

Determinou-se a composição granulométrica das partículas com o objetivo de ajustar os comprimentos das partículas e suas quantidades nas misturas, uma vez que, com base na literatura, a geometria das partículas é de suma importância para as propriedades finais dos painéis. Com o ensaio de composição granulométrica

obteve-se o percentual retido e passante em cada peneira, bem como os módulos de finura das cinco misturas, conforme pode ser observado nas Tabelas de 15 a 19.

Em suma, verificou-se que para todas as misturas as partículas ficaram retidas principalmente nas peneiras de 8 e 16 mesh, sendo estas dimensões as que apresentam maior rendimento no processo de moagem adotado nos moinhos laboratoriais.

Tabela 15 – Composição Granulométrica 100% Seringueira.

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
4	4,76	0,65	0,65	1,87	1,87	34,35	98,13
8	2,38	21,73	22,38	62,08	63,94	12,62	36,06
16	1,19	12,39	34,77	35,39	99,33	0,23	0,67
30	0,595	0,16	34,93	0,47	99,80	0,07	0,20
50	0,297	0,00	34,93	0,00	99,80	0,07	0,20
100	0,149	0,00	34,93	0,00	99,80	0,07	0,20
Fundo	Fundo	0,00	34,93	0,00	99,80	0,07	0,20
Massa Ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de Finura	
35,00		0,07		0,20		4,65	

Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 15 observa-se que ocorreu retenção de partículas principalmente nas peneiras com aberturas de malha (D) equivalentes a 4,76; 2,38 e 1,19mm, respectivamente. O percentual retido na peneira com abertura de 4,76mm foi de (1,87% ou 0,65g), percentual muito menor quando comparado aos 62,08% (21,73g) de material retido na peneira com abertura de 2,38 mm e, aos 35,39% (12,39g) de material retido na peneira com abertura de 1,19 mm, ou seja, dos 35g da massa de partículas ensaiadas, ficaram retidos nas referidas peneiras, o equivalente 21,73g e 12,39g, respectivamente, correspondendo a 34,12g (97,47%) do total da massa (35g) de partículas ensaiadas.

A massa retida na peneira com D de 0,595mm foi de apenas 0,16g (0,47%) do total da massa (35g) ensaiada, ou seja, uma porcentagem muito menor quando comparado à porcentagem retida nas peneiras com D de 2,38mm e 1,19mm, respectivamente. Foi verificado também que as massas retidas nas peneiras com abertura D de 0,297mm, 0,149mm e fundo, foram nulas, não influenciando nas composições granulométricas das misturas.

Considerando-se os resultados obtidos com os ensaios para composição granulométrica das partículas de seringueira, consequentemente, utilizou-se para produção dos painéis com 100% de seringueira, as partículas retidas nas peneiras com D de 2,38mm e 1,19mm.

A Tabela 16 apresenta os valores obtidos para a composição granulométrica da mistura com 70% de Seringueira e 30% de Teca.

Tabela 16 – Composição Granulométrica 70% Seringueira e 30% Teca.

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
4	4,76	0,80	0,80	2,28	2,28	34,20	97,72
8	2,38	21,28	22,07	60,79	63,06	12,93	36,94
16	1,19	12,61	34,68	36,01	99,08	0,32	0,92
30	0,595	0,25	34,93	0,71	99,79	0,07	0,21
50	0,297	0,00	34,93	0,00	99,79	0,07	0,21
100	0,149	0,00	34,93	0,00	99,79	0,07	0,21
Fundo	Fundo	0,00	34,93	0,00	99,79	0,07	0,21
Massa Ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de Finura	
35,00		0,07		0,21		4,64	

Fonte: Acervo da autora.

Nos resultados para determinação da composição granulométrica apresentados na Tabela 16, observa-se que a maioria das partículas ficou retida nas peneiras com D de 4,76mm; 2,38mm e 1,19mm, respectivamente. Foi verificado que o percentual retido na peneira com D de 4,76mm (2,28% ou 0,80g) foi menor quando comparado com os percentuais retidos nas peneiras com D de 2,38mm (60,79% ou 21,28g) e de 1,19mm (36,01% ou 12,61g).

A massa retida na peneira com D de 0,595mm foi de 0,25g (0,71%), foi muito menor em comparação às massas retidas nas peneiras com D de 2,38mm e 1,19mm, ou seja, 21,28g e 12,61g, respectivamente.

Nas peneiras com D de 0,297 mm, 0,149 mm e fundo foram nulas, não influenciando na composição granulométrica das misturas.

Considerando-se o ensaio para composição granulométrica das partículas com 70% de Seringueira e 30% de Teca, utilizaram-se para produção dos painéis as partículas retidas nas peneiras com D de 2,38mm e 1,19mm.

Na Tabela 17 verifica-se a composição granulométrica da mistura com 50% de seringueira e 50% de teça.

Tabela 17 – Composição Granulométrica 50% Seringueira e 50% Teca.

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
4	4,76	1,69	1,69	4,83	4,83	33,31	95,17
8	2,38	19,81	21,50	56,59	61,42	13,50	38,58
16	1,19	13,02	34,52	37,20	98,62	0,48	1,38
30	0,595	0,43	34,95	1,23	99,85	0,05	0,15
50	0,297	0,00	34,95	0,00	99,85	0,05	0,15
100	0,149	0,00	34,95	0,00	99,85	0,05	0,15
Fundo	Fundo	0,00	34,95	0,00	99,85	0,05	0,15
Massa Ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de Finura	
35,00		0,05		0,15		4,64	

Fonte: Acervo da autora.

Neste ensaio para determinação da Composição Granulométrica, verificou-se que as partículas ficaram retidas principalmente nas peneiras com D de 4,76mm (4,83% ou 1,69g), 2,38mm (59,59% ou 19,81g) e 1,19mm (37,20% ou 13,02g). Assim sendo, o percentual retido e acumulado nessas três peneiras foi de 98,62%.

A massa retida na peneira com D de 0,595mm foi de apenas 1,23% ou 0,43g e, conseqüentemente, não influenciando a composição granulométrica da mistura.

Considerando-se o ensaio de Composição Granulométrica realizado, para produção dos painéis com 50% de partículas de Seringueira e 50% de partículas de Teca, utilizaram-se as partículas retidas na peneira com D de 2,38mm e 1,19mm.

Na Tabela 18 verifica-se a composição granulométrica da mistura com 30% de Seringueira e 70% de Teca e verifica-se que ocorreram retenções de partículas nas peneiras com D de 2,38mm (58,69 ou 20,54g) e 1,19mm (34,40% ou 12,04g), conseqüentemente, o percentual retido nessas duas foi de 93,79% da massa total (35g) ensaiada.

Tabela 18 – Composição Granulométrica 30% Seringueira e 70% Teca.

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
4	4,76	1,86	1,86	5,30	5,30	33,14	94,70
8	2,38	20,54	22,40	58,69	63,99	12,60	36,01
16	1,19	12,04	34,44	34,40	98,39	0,56	1,61
30	0,595	0,48	34,92	1,38	99,77	0,08	0,23
50	0,297	0,00	34,92	0,00	99,77	0,08	0,23
100	0,149	0,00	34,92	0,00	99,77	0,08	0,23
Fundo	Fundo	0,00	34,92	0,00	99,77	0,08	0,23
Massa Ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de Finura	
35,00		0,08		0,23		4,67	

Fonte: Acervo da autora.

A massa retida na peneira com D de 0,595 foi de 1,38% ou 0,48g, ou seja, pouco influenciando na composição granulométrica da mistura, conseqüentemente, para a produção dos painéis com 30% de Seringueira e 70% de Teca, utilizou-se as partículas retidas nas peneiras com D de 4,76mm; 2,38mm e 1,19mm.

Na Tabela 19 verifica-se a Composição Granulométrica das partículas de Teca.

Tabela 19 – Composição Granulométrica 100% Teca.

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
4	4,76	2,16	2,16	6,18	6,18	32,84	93,82
8	2,38	20,67	22,83	59,05	65,23	12,17	34,77
16	1,19	11,60	34,43	33,14	98,37	0,57	1,63
30	0,595	0,53	34,96	1,50	99,88	0,04	0,12
50	0,297	0,00	34,96	0,00	99,88	0,04	0,12
100	0,149	0,00	34,96	0,00	99,88	0,04	0,12
Fundo	Fundo	0,00	34,96	0,00	99,88	0,04	0,12
Massa Ensaio (g)		Perdas (g)		Perdas (%)		Módulo de Finura	
35,00		0,04		0,12		4,69	

Fonte: Acervo da autora.

De acordo com o ensaio para determinação da Composição Granulométrica das partículas de Teca, verificaram-se retenções de partículas nas peneiras com D de 4,76mm (6,18% ou 2,16g), 2,38mm (59,5% ou 20,67g) e 1,19mm (33,14% ou 11,60g),

ou seja, o percentual retido nas três peneiras foi de 98,37% do total da massa ensaiada (35g).

Foi observado que na peneira com D de 0,595mm ficou retido 0,53g ou 1,5% da massa total ensaiada (35g), não influenciando na composição granulométrica da mistura. Consequentemente considerou-se para produção dos painéis de Teca, as partículas retidas nas peneiras com D de 4,76mm; 2,38mm; 1,19mm.

5.2 Avaliação das propriedades dos painéis

5.2.1 Densidade

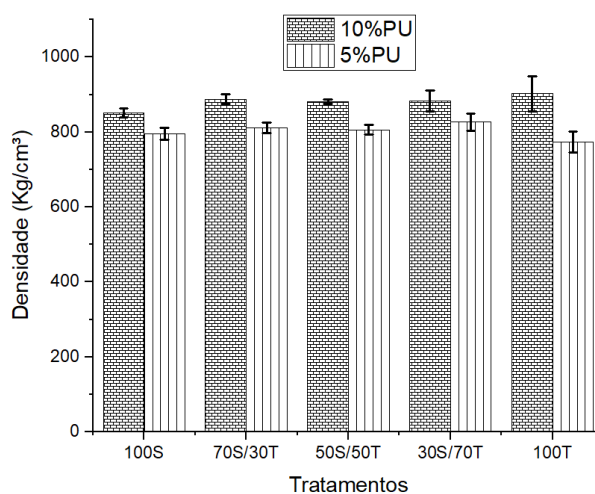
Com base no ensaio para determinação da densidade dos painéis, foi possível calcular a densidade média e o módulo máximo de variação da densidade (D%) dos painéis. Os valores encontrados foram comparados com os exigidos pela NBR14810-1:2013 e com a literatura de referência. Na Tabela 20 e no gráfico da Figura 35, verificam-se os valores médios de densidades dos painéis em função de cada tratamento estudado.

Tabela 20 – Densidade dos painéis.

Tratamento	D Média (g/cm ³)	D (%)	CV (%)	% de Resina
T_{100S}^{10PU}	0,851	1	1,43	10
T_{70S30T}^{10PU}	0,888	1	1,54	10
T_{50S50T}^{10PU}	0,881	0	0,69	10
T_{30S70T}^{10PU}	0,884	2	3,14	10
T_{100T}^{10PU}	0,902	4	5,26	10
T_{100S}^{5PU}	0,796	2	1,98	5
T_{70S30T}^{5PU}	0,811	1	1,71	5
T_{50S50T}^{5PU}	0,806	1	1,56	5
T_{30S70T}^{5PU}	0,827	2	2,79	5
T_{100T}^{5PU}	0,773	3	3,66	5

Fonte: Acervo da autora.

Figura 35 – Gráfico da densidade dos painéis.



Fonte: Acervo da autora.

A NBR 14810-1 (ABNT, 2013), estabelece que a densidade de painéis de partículas de média densidade esteja no intervalo de 0,551 a 0,750 g/cm³ e apresentem módulo máximo de variação da densidade de 7%. Dessa maneira, os valores de densidade obtidos para os tratamentos estudados, encontraram-se acima do valor máximo estabelecido pelo documento normativo, porém os módulos máximos de variação da densidade de todos os tratamentos estão de acordo com a norma.

Analisando os resultados da Tabela 20, verifica-se que as densidades médias aparentes dos painéis com os tratamentos com 10% de PU-Mamona são superiores em relação aos painéis dos tratamentos com 5% de PU-Mamona.

O valor de densidade do tratamento 1 com 100% seringueira e 10% PU-Mamona foi de 0,851 g/cm³, esse valor é muito próximo ao encontrado por Gava *et al.* (2015), que estudou painéis confeccionados com 100% seringueira e 12% PU-Mamona e obteve uma densidade de 0,842 g/cm³.

Souza *et al.* (2018) obtiveram densidade média de 0,860 g/cm³ para os painéis produzidos com 100% Teca e 5% de resina ureia formaldeído aglutinados com resíduos de tinta à base de epóxi, sendo um valor intermediário ao encontrado no presente trabalho, uma vez que, os painéis com 100% Teca e 10% de resina obtiveram 0,902 g/cm³ de densidade e os painéis com 100% Teca e 5% de adesivo apresentaram densidade de 0,773 g/cm³.

5.2.2 Teor de Umidade

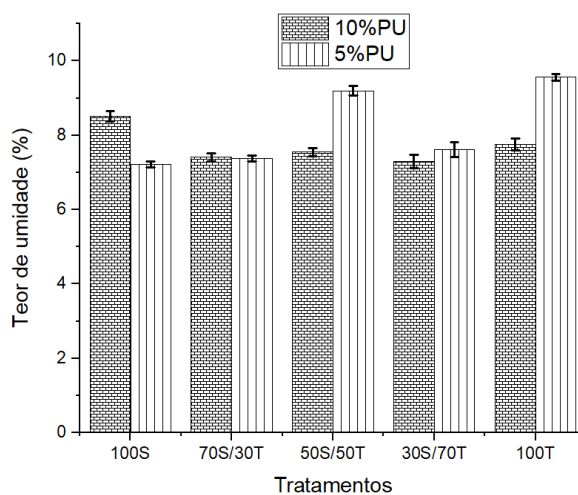
Na Tabela 21 e Figura 36 são observados os valores médios determinados para os teores de umidade dos painéis de cada tratamento.

Tabela 21 – Teor de umidade.

Tratamento	U média (%)	CV(%)	% de Resina
T_{100S}^{10PU}	8,51	1,59	10
T_{70S30T}^{10PU}	7,41	1,45	10
T_{50S50T}^{10PU}	7,55	1,48	10
T_{30S70T}^{10PU}	7,29	2,40	10
T_{100T}^{10PU}	7,75	2,00	10
T_{100S}^{5PU}	7,22	1,04	5
T_{70S30T}^{5PU}	7,38	1,09	5
T_{50S50T}^{5PU}	9,20	1,48	5
T_{30S70T}^{5PU}	7,61	2,68	5
T_{100T}^{5PU}	9,57	0,94	5

Fonte: Acervo da autora.

Figura 36 – Gráfico do teor de umidade dos painéis.



Fonte: Acervo da autora.

Com base nas análises realizadas, verifica-se que os valores obtidos são correspondentes ao intervalo de 5 a 13%, estabelecidos pela norma brasileira.

5.2.3 Inchamento após 24h

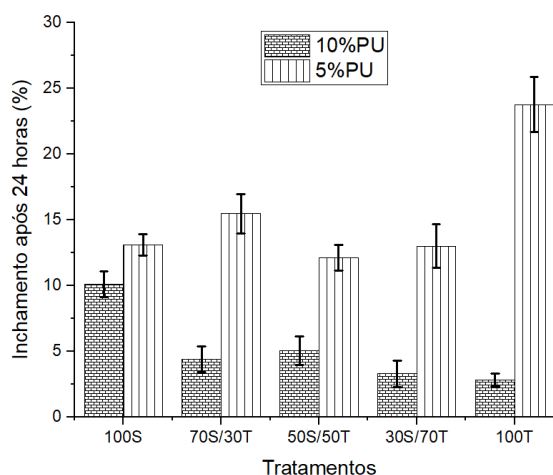
Na Tabela 22 e Figura 37 se observa os valores obtidos com os ensaios de Inchamento após 24h para painéis com espessura superior a 13 mm e seu respectivo enquadramento de acordo com a classificação proposta pela NRB14810-2:2018.

Tabela 22 – Inchamento após 24h.

Tratamento	I 24h médio (%)	CV (%)	% de Resina	Classificação
T_{100S}^{10PU}	10,09	9,71	10	P2, P3, P4 e P6
T_{70S30T}^{10PU}	4,39	22,66	10	Todos
T_{50S50T}^{10PU}	5,04	21,37	10	Todos
T_{30S70T}^{10PU}	3,30	30,20	10	Todos
T_{100T}^{10PU}	2,81	17,51	10	Todos
T_{100S}^{5PU}	13,09	6,21	5	P2, P3, P4 e P6
T_{70S30T}^{5PU}	15,48	9,63	5	P2
T_{50S50T}^{5PU}	12,12	7,98	5	P2, P3, P4 e P6
T_{30S70T}^{5PU}	13,01	12,69	5	P2, P3, P4 e P6
T_{100T}^{5PU}	23,78	8,74	5	Nenhum

Fonte: Acervo da autora.

Figura 37 – Gráfico do inchamento após 24h dos tratamentos.



Fonte: Acervo da autora.

Com base nos valores obtidos de Inchamento após 24 horas para os painéis caracterizados de acordo com os tratamentos propostos, foi verificado que se enquadram nas várias classificações de uso, conforme proposto pela referida norma brasileira, contudo, foi observado que os painéis com 100% Teca e 5% PU-Mamona, não se enquadram em nenhuma classificação proposta.

A Figura 38 ilustra os aspectos gerais de um cp com 100% Seringueira e 5% PU-Mamona antes e depois de ser submerso em água com 24h.

Figura 38 – Aspectos gerais do cp de seringueira antes e depois do ensaio de Inchamento



Fonte: Acervo da autora.

Analizando os resultados para os ensaios de Inchamento após 24h verificou-se que o maior teor de resina garantiu menor inchamento aos painéis, sendo possível empregá-los sob condições úmidas de acordo com a proposta de classificação do documento normativo brasileiro. Porém com maior quantidade de resina (10%) a extensão da variabilidade em relação à média é maior do que com 5% de resina, ou seja, a repetitividade das medidas é menor para uma concentração de 10% PU. Tais resultados demonstram que para porcentagem de resina de 10% o sistema compósito atingiu o limiar de percolação, de maneira que o recobrimento das partículas de madeira pelo PU foi mais efetivo comparativamente as amostras preparadas com 5% de PU. Em tal situação, a absorção de água pelas amostras é controlada pela matriz, no caso, o poliuretano.

A maior variabilidade encontrada nos resultados das amostras com 10% de PU estão relacionados a possibilidade estatística de defeitos no recobrimento das partículas que podem ocorrer na preparação dos painéis, por sua vez, a menor variabilidade encontrada para as amostras de menor concentração, se relacionam ao fato de que a absorção de água nessas amostras é quase que exclusivamente controlada pelas propriedades dos particulados, o que pode ser melhor observado nas imagens de microscopia eletrônica de varredura.

Os gráficos de inchamento indicam por meio das amostras 100% Seringueira e 100% Teca que o encapsulamento das partículas, originado pela presença da resina, ocorre com maior efetividade para as amostras contendo puramente a Teca. Tal fato sugere que a interação físico-química entre o PU e Teca pode ser mais intensa, gerando uma maior uniformidade de recobrimento dos particulados nos painéis com 10% de resina, bem como, regiões de concentração nos painéis com 5%, oriundas de pontos de maior exposição da lignina e hemicelulose durante a constituição dos particulados. Tal fato elucida os menores valores de inchamento e, portanto, de absorção de água, observados para as misturas, bem como sua tendência de redução

constatada para as amostras com o aumento do teor de Teca em concentrações de 10% PU-Mamona.

Os resultados de inchamento dos dez tratamentos propostos, até mesmo com 5% de resina foram inferiores aos encontrados por Muzel *et al* (2015), Iwakiri *et al.* (2018), Juliana, Paridah e Anwar (2012), Wechsler *et al.* (2013) e Fiorelli *et al.* (2012) nos tratamentos em que utilizaram a resina ureia formaldeído como adesivo, evidenciando que o uso da resina poliuretano até mesmo em baixas porcentagens proporcionam menor inchamento aos painéis.

Os painéis com 10% de resina apresentaram menor inchamento do que todos os valores encontrados por Gava *et al* (2015), Wechsler *et al.* (2013), Cravo, Sartori e Fiorelli (2017) e Fiorelli *et al.* (2012) mesmo estes também utilizando a resina PU-Mamona e em maior quantidade desta.

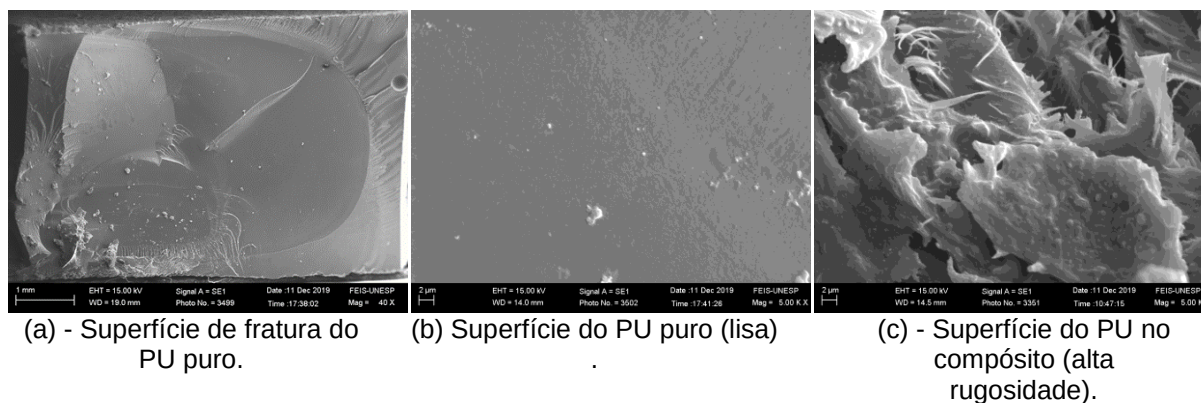
Lacombe (2015) que utilizou plástico EPS (isopor) como aglutinante obteve 0,84%, ou seja, um valor extremamente baixo de inchamento, sendo inferior a todos os resultados encontrados no presente trabalho e nas referências pesquisadas. Souza *et al.* (2018) que utilizaram a ureia formaldeído em associação com resíduos de tinta à base de epóxi como adesivo obtiveram de 7,27% de inchamento, evidenciando que ureia formaldeído em associação com resíduos de tinta à base epóxi pode atingir valores de inchamento muito próximo ao inchamento produzido com 10% de resina PU-Mamona, como pode ser observado neste trabalho.

5.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias, obtidas por MEV, das superfícies do poliuretano e dos compósitos poliuretano/madeira, fraturados em nitrogênio líquido, contendo diferentes proporções de madeira com 5 e 10% de resina, estão apresentadas nas Figuras de 39 a 42.

A Figura 39a ilustra a superfície de fratura do PU-Mamona puro. Comparando-se o poliuretano puro (Figura 39b) com este nos compósitos (Figura 39c), ou seja, quando em mistura com a madeira, verifica-se um aumento na rugosidade, sendo indicativo da ocorrência de interações físico-químicas entre a matriz poliuretano e as partículas de madeira. Alta rugosidade quando comparadas ao PU puro, indicam um aumento na dissipação de energia durante a fratura, fato atribuído à presença de possíveis ligações de hidrogênio entre a celulose/ lignina ou mesmo hemicelulose com a matriz (SANCHES, 2016).

Figura 39 – Imagens de MEV do PU-Mamona puro e em compósito.

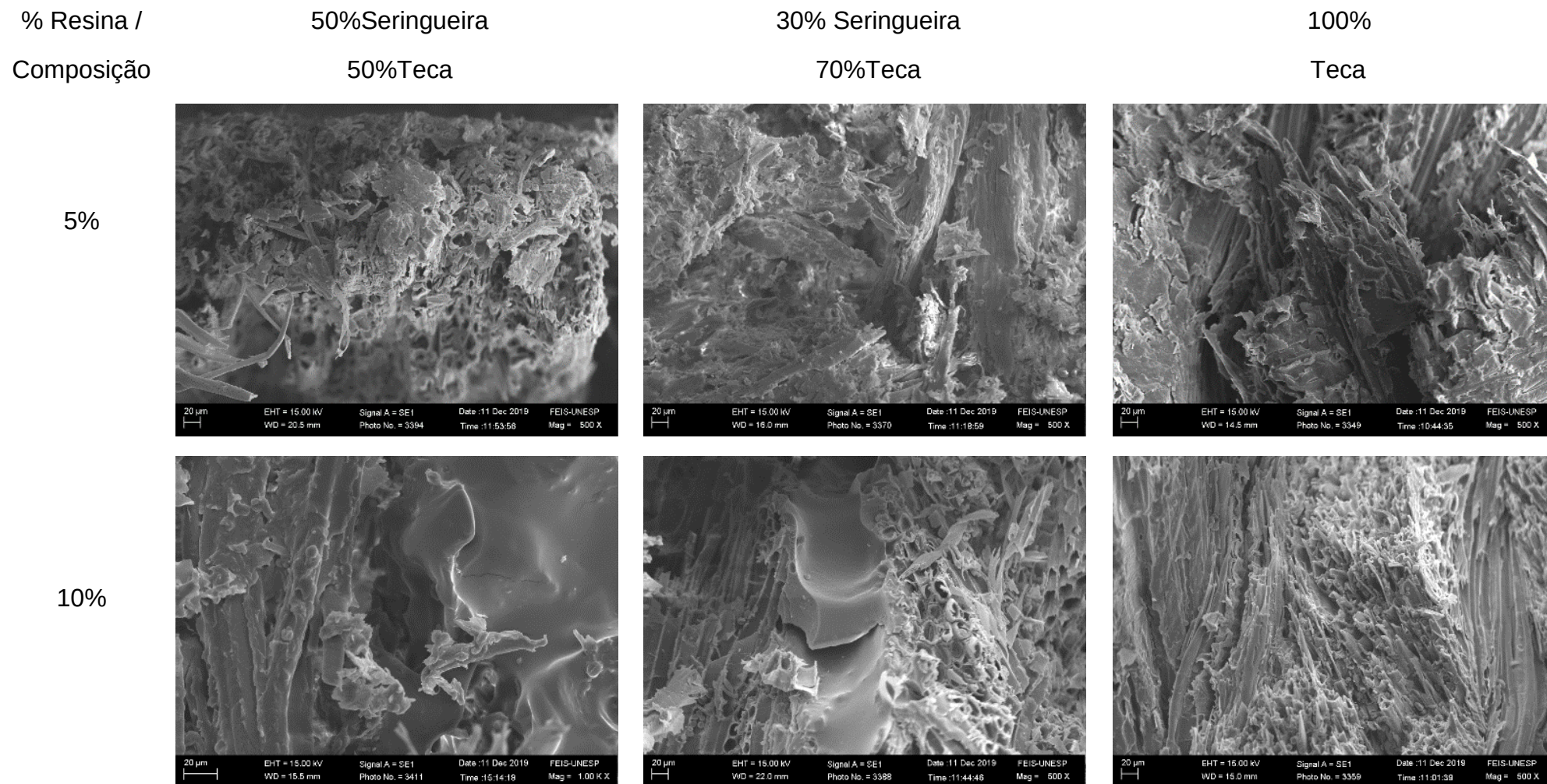


Fonte: Acervo da autora.

Nas Figuras 40 e 41, observa-se que os tratamentos com 5% de resina apresentam menor recobrimento e menor uniformidade da cobertura das partículas pelo poliuretano quando comparados com os tratamentos com 10% de resina, com maior exposição das fibras da madeira e regiões de concentração. Os resultados observados nas imagens obtidas pelo ensaio de microscopia eletrônica confirmam os resultados obtidos por inchamento de água dos painéis com 5% e 10% de resina observada na Tabela 22. Nos painéis com 5% de resina verificou-se valores muito altos de inchamento, e nas imagens de MEV observou-se nestes painéis, regiões nas quais as partículas de madeira não se encontravam recobertas por PU, além de uma má distribuição da resina. Enquanto nos painéis com 10% de PU obtiveram valores mais baixos de inchamento, bem como, nas imagens de MEV destes, visualizou-se bom recobrimento das fibras pela resina, e maior homogeneidade da distribuição desta.

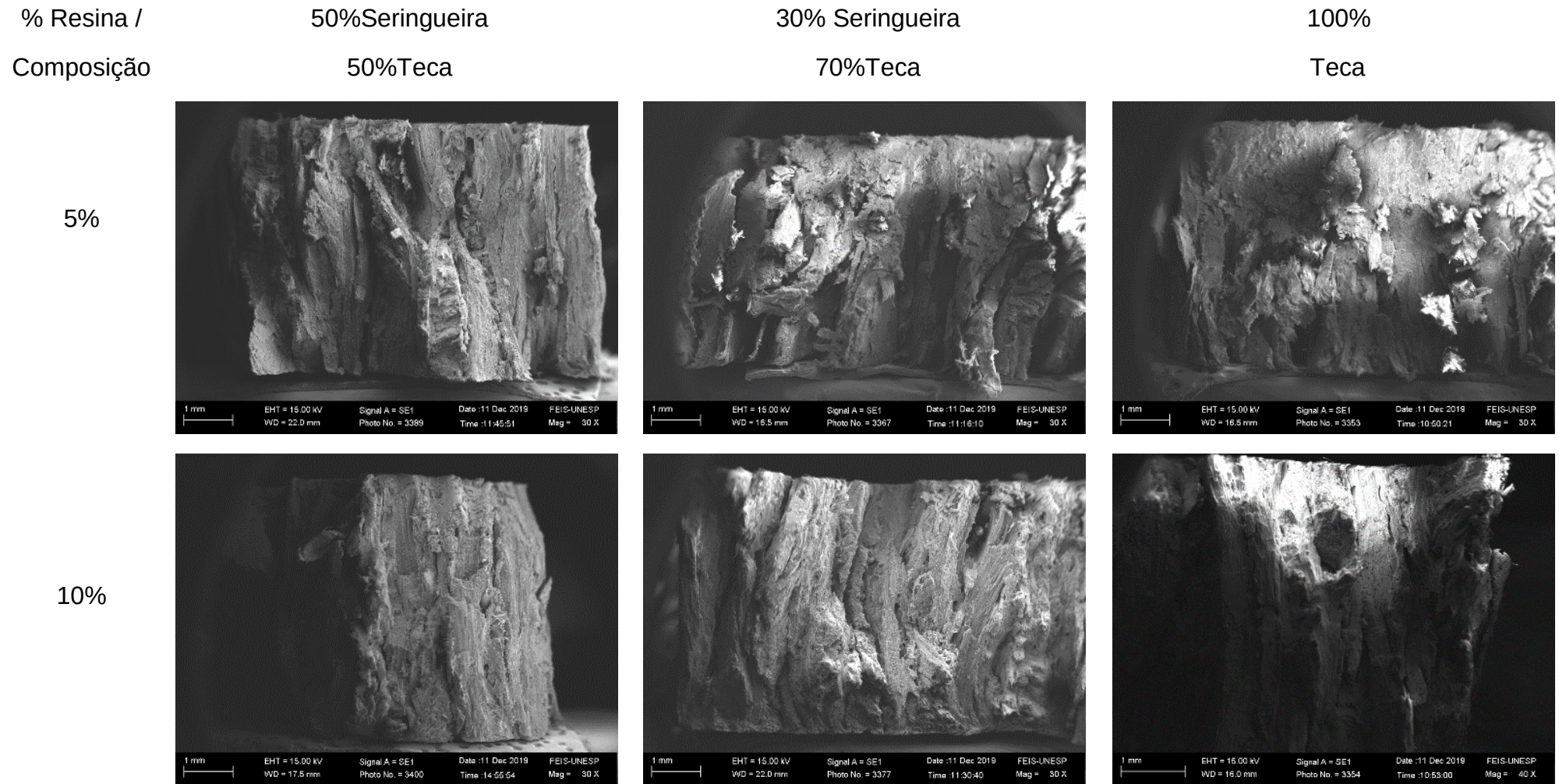
Essa associação dos resultados físicos (inchamento) com as micrografias, deve-se ao fato de o poliuretano ser um material mais resistente a água, mais impermeável a ela, enquanto as madeiras tendem a ser menos resistentes à água. Por esse motivo, nas amostras com 10% de resina, verificamos um sistema percolado, no qual pouca água consegue ser absorvida pelo painel porque a madeira está melhor recoberta pelo PU-Mamona, enquanto, nas amostras com 5% de resina observa-se um sistema não percolado, com menor recobrimento pela resina, e mais fibras “desencapadas” sendo mais susceptíveis ao inchamento e absorção, ou seja, sendo este controlado pelo particulado.

Figura 40 – Imagens de MEV do recobrimento das partículas.



Fonte: Acervo da autora.

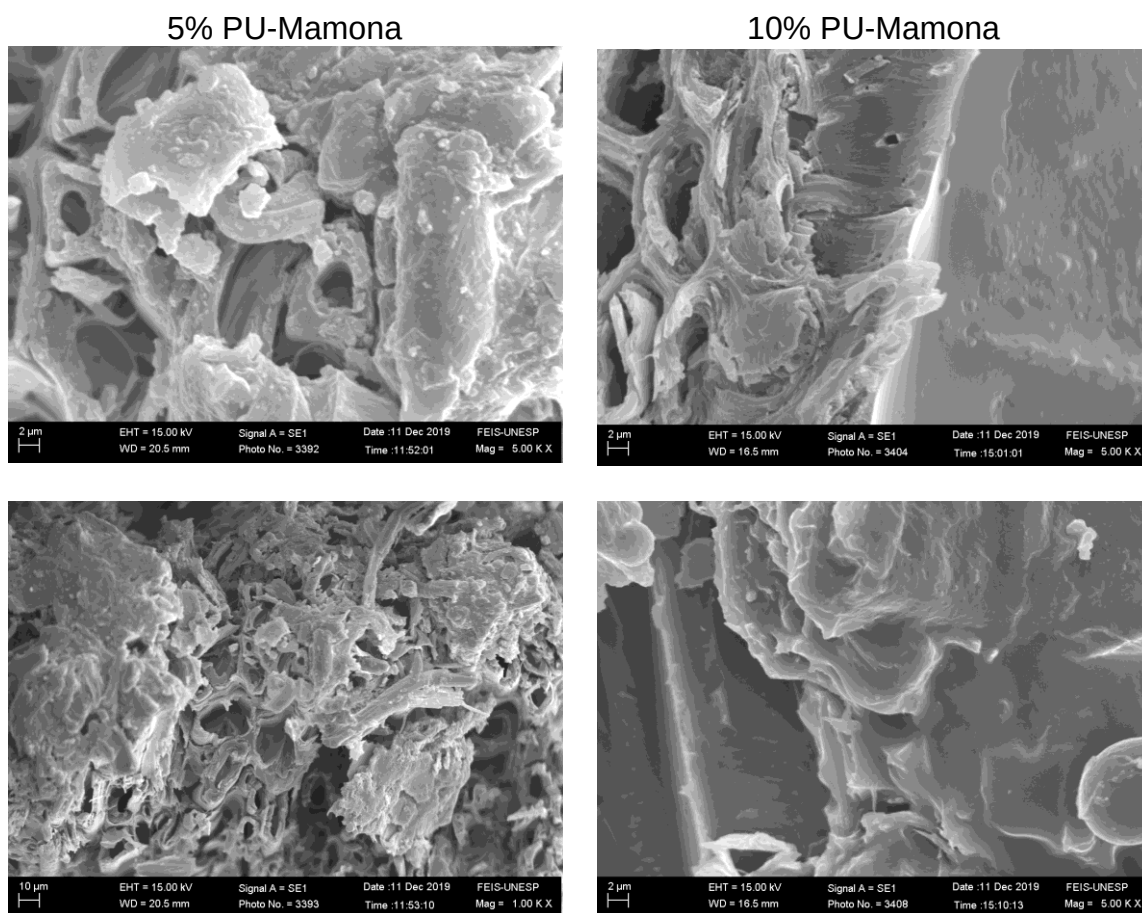
Figura 41 – Imagens de MEV da Superfície de Fratura das amostras.



Fonte: Acervo da autora.

Com as imagens obtidas pelo ensaio de MEV, foi possível observar microscopicamente a interface poliuretano-madeira. As interfaces das amostras com 5% e 10% de PU-Mamona estão ilustradas na Figura 42.

Figura 42 – Micrografias da interface entre poliuretano-madeira

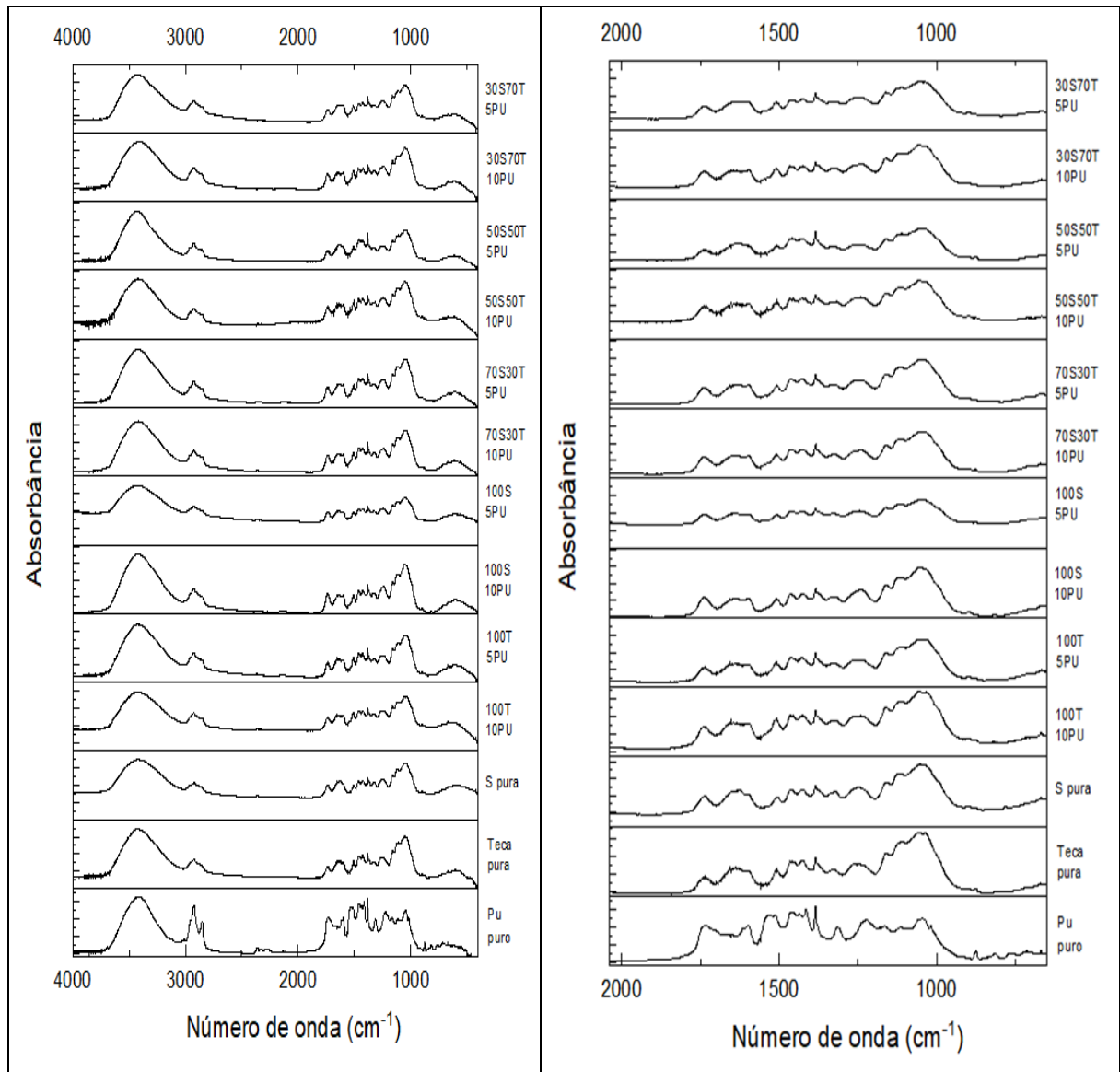


Fonte: Acervo da autora.

5.2.2 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

As bandas de absorção características das madeiras e PU puros, bem como dos tratamentos, foram analisadas por meio da técnica de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier. Os espectros estão representados na Figura 43. As atribuições das bandas foram realizadas fazendo a comparação dos valores de comprimentos de onda característicos para os grupos existentes na molécula, de acordo com a referência encontrada. As principais atribuições, referências e absorções das amostras puras estão representadas na Tabela 23 enquanto dos compósitos encontram-se no Apêndice A.

Figura 43 – Espectros das madeiras puras, PU puro e das misturas.



Fonte: Acervo da autora.

Tabela 23 – Absorções de FTIR referentes as amostras puras. (Continua)

Referências	Atribuições	Absorções das amostras puras (cm^{-1})		
		PU (1)	S (2)	T (3)
Popescu <i>et al.</i> . (2020); Broda e Popescu (2019); Andrade (2002); Souza (2002).	(1) Deformação axial do OH em ligação de hidrogênio intramolecular. (2,3) Ligações inter e intra moleculares de hidrogênio pertencentes aos principais componentes químicos da madeira.	3420	3421	3421
Popescu <i>et al.</i> . (2020); Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramentos vibracionais dos grupos CH advindos de ambos os metilenos aromático –OCH ₃ e alifáticos bem como, dos grupos de cadeia lateral metil.	2955	2961	2960
Li, Niu e Lu (2017); Broda e Popescu (2019).	(1) Vibração de alongamento simétrica e assimétrica de CH ₂ . (2,3) Vibrações de estiramento simétricas e assimétricas do grupo metil.	2923	2922	2924
Broda e Popescu (2019); Li, Niu e Lu (2017); Macalino, Salen e Reyes (2017).	(1) Vibração de estiramento simétrico e assimétrico do CH ₂ da cadeia de hidrocarbonetos do óleo de mamona e HMDI. (2,3) Vibrações de estiramento simétricas e assimétricas do grupo metileno.	2853	2853	2857
Souza (2002).	Estiramentos simétricos da ligação C-H com a carbonila.	2731		
Souza (2002); Broda e Popescu (2019).	(1) Estiramento da ligação –C=O e da ligação C-O-C presente nos uretanos (2,3) vibrações de estiramento do grupo C=O grupos acetil, carbonil e carboxil (de origem de carboidratos).	1734	1740	1740
Broda e Popescu (2019).	(2,3) C-O conjugados em quininas acoplados ao estiramento C=O de vários grupos e ao estiramento vibracional dos grupos OH da água adsorvida.		1653	1654
Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramento do grupo OH pertencente a água adsorvida.		1634	1636
Souza (2002); Broda e Popescu (2019); Chen, Zhou e Sun (2016); Propescu, Gradinariu e Propescu (2016).	(1) Estiramento da ligação C-N e da deformação da ligação N-H. (2,3) Estiramento das ligações C=C do anel aromático da lignina.	1598	1596	1597

Souza (2002).	(1) Estiramento da ligação C-N e da deformação da ligação N-H.	1541		
Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramento C=C do anel aromático (lignina).	1512	1506	1507
Li, Niu e Lu (2017); Broda e Popescu (2019).	(1) Alcanos - vibração de deformação assimétrica CH_3 . (2,3) Vibração do tipo deformação dos grupos CH_2 presentes na lignina e carboidratos.	1456	1464	1466
Chen, Zhou e Sun (2016); Oliveira (2009).	(2,3) Deformação C-H no plano (celulose) e vibrações do anel (lignina).		1425	1425
Broda e Popescu (2019).	(2,3) Vibrações de estiramento dos grupos C - H presentes na celulose		1331	1332
Popescu <i>et al.</i> (2020).	(2,3) Modo de flexão C-H na celulose e estiramento C-O na lignina		1259	1261
Popescu <i>et al.</i> (2020).	(2,3) Ligações C-O em grupos metoxila aromáticos guaiacil e grupos acetil em xiloglucanos.		1247	1246
Souza (2002).	(1) Torção e balanço da ligação $-CH_2-$	1222		
Propescu, Gradinariu e Propescu (2016).	(2,3) Estiramento C=O da carbonila, carboxila e grupos acetil, deformação C-H em carboidratos e vibrações de estiramento C-O-C em carboidratos.	1164	1160	1161
Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramento vibracional das ligações C - O da lignina e carboidratos.	1127	1122	1122
Souza (2002); Propescu, Gradinariu e Propescu (2016).	(1) Estiramento da ligação $-C=O$ e da ligação C-O-C presente nos uretanos. (2,3) estiramento vibracional C-O em carboidratos.	1055	1053	1056
Oliveira (2009).	(2,3) Deformação CH aromático; deformação C-O em álcool e ésteres; estiramento C-O-C dialquil éteres.		1038	1036
Li, Niu e Lu (2017).	(1) Olefina -Vibração de balanço fora do plano de $=C-H$.	915		
Popescu <i>et al.</i> (2020).	(2,3) Deformação C-H na celulose.		898	899
Chen, Zhou e Sun (2016).	(2,3) Flexão fora do plano de Ph-H.	712	714	712
Li, Niu e Lu (2017).	(1) CO_2 - vibração de flexão no plano de $C=O$	669	668	669

Fonte: Acervo da autora.

Em geral, como observado na Figura 43, o espectro dos compósitos apresenta uma composição da sobreposição das bandas tanto do PU quanto da Seringueira e da Teca. Pode-se observar um alargamento da banda presentes na região entre 4000-2700 cm^{-1} como consequência dessa sobreposição, indicando principalmente, um

aumento na densidade de ligações de hidrogênio comparativamente as amostras puras de PU, Seringueira e Teca.

Não foram observados deslocamentos substanciais, mas apenas o alargamento das principais bandas de absorção que poderiam indicar a presença de prováveis ligações de hidrogênio entre os componentes, a citar nas regiões de 1600-1750 referentes ao estiramento das ligações N-H e C=O do poliuretano, bem como, da região entre 1400-1100 cm^{-1} referentes as principais absorções presentes na hemicelulose e lignina. Tal fato associado as medidas de MEV, indicam que a predominância da formação de novas interações químicas, ligadas a formação de ligações de hidrogênio entre a matriz e o particulado seja substituído parcialmente por interações com a água adsorvida, originada, principalmente, pela sua concentração na interface PU/particulado advinda da migração da água da madeira para região de interface durante a prensagem a quente acrescida por sua dificuldade de difusão para o meio externo devido ao recobrimento pela resina.

5.2.3 Módulo de Resistência à Flexão Estática

Os valores mínimos de módulo de resistência à flexão estática por tipo de uso dos painéis com espessura maior que 13 mm até 20 mm estão representados na Tabela 24.

Tabela 24 – Valor de MOR mínimo por tipo de uso.

NBR 14810-2:2018 – Espessura > 13 a 20 mm	
Classificação	Valor mínimo para o MOR em MPa
P2	11
P3	14
P4	15
P5	16
P6	18
P7	20

Fonte: Adaptado de ABNT (2013b).

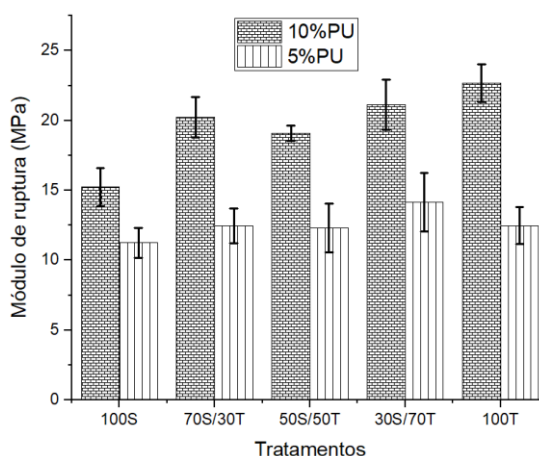
A Tabela 25 e Figura 44 apresentam os resultados médios obtidos de Módulo de Resistência à Flexão Estática, bem como a classificação nas condições de uso que podem ser empregados.

Tabela 25 – Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR).

Tratamento	MOR (MPa)	CV(%)	% de Resina	Classificação
T_{100S}^{10PU}	15,23	8,88	10	P2, P3 e P4
T_{70S30T}^{10PU}	20,24	7,04	10	Todos
T_{50S50T}^{10PU}	19,10	2,91	10	P2, P3, P4, P5 e P6
T_{30S70T}^{10PU}	21,11	8,49	10	Todos
T_{100T}^{10PU}	22,67	5,98	10	Todos
T_{100S}^{5PU}	11,24	9,58	5	P2
T_{70S30T}^{5PU}	12,46	10,16	5	P2
T_{50S50T}^{5PU}	12,31	14,15	5	P2
T_{30S70T}^{5PU}	14,16	14,77	5	P2 e P3
T_{100T}^{5PU}	12,48	10,56	5	P2, P3 e P4

Fonte: Acervo da autora.

Figura 44 – Gráfico de módulo de ruptura dos painéis.



Fonte: Acervo da autora.

Com base nos valores da Tabela 25, verifica-se que todos os painéis referentes aos tratamentos propostos podem ser empregados em pelo menos um tipo de uso.

Os painéis dos tratamentos com 10% de resina apresentaram valores de MOR superiores aos tratamentos com 5% de resina. O aumento do MOR de 10% de resina em relação a 5% desta para 100% seringueira, 70% Seringueira + 30% Teca, 50% Seringueira + 50% Teca, 30% Seringueira + 70% Teca e 100% Teca foi respectivamente de 26,20%; 38,44%; 35,55%; 32,92% e 26,29%.

Os painéis dos tratamentos com maior porcentagem de Teca apresentaram maior resistência à flexão estática, tanto para 10% quanto 5%, relacionado provavelmente ao formato das partículas de Teca e de suas características físicas e mecânicas.

Os resultados de módulo de ruptura dos dez painéis dos tratamentos propostos, produzidos com 5% e 10% de resina PU-Mamona, são superiores aos encontrados

por Muzel *et al.* (2015) e Wechsler *et al.* (2013) em seus estudos com painéis produzidos com resina ureia formaldeído, evidenciando que, o uso da resina PU-Mamona, mesmo empregando-se 5% para produção dos painéis, proporcionam maior resistência à flexão.

Os painéis com 10% de PU-Mamona apresentaram maior módulo de ruptura, quando comparados com os valores determinados por Gava *et al.* (2015) e Cravo, Sartori e Fiorelli (2017) para produção de painéis utilizando-se resíduos de saco de cimento.

Para os painéis produzidos com 5% de PU-Mamona, o MOR obtido foi inferior aos encontrados por Juliana, Paridah e Anwar (2012) e Fiorelli *et al.* (2012) nos estudos para produção de painéis empregando-se resina ureia formaldeído.

Fiorelli *et al.* (2012), em seus estudos para produção de painéis empregando-se UF e PU-Mamona e, Souza *et al.* (2018), nos estudos para produção de painéis empregando-se UF em associação com resíduos de tinta à base de epóxi, obtiveram valores de MOR inferiores aos valores de MOR obtidos nos painéis produzidos com 10% de PU-Mamona, sendo, entretanto, superiores aos valores de MOR para os painéis produzidos com 100% de Seringueira, 5% e 10% de resina PU-Mamona, provavelmente os menores valores obtidos podem estar relacionados a geometria das partículas de Seringueira, bem como suas propriedades físicas e mecânicas.

Os valores de MOR obtidos nos estudos realizados por Abdul Khalil *et al.* (2010) para produção de painéis de partículas de Seringueira, são significativamente superiores ao maior valor encontrado no presente trabalho, entretanto, ressalta-se que os estudos desenvolvidos pelos autores foram para produção dos painéis do tipo Medium Density Fiberboard (MDF), ou seja, painéis de média densidade produzidos com fibras de madeira de seringueira.

Cravo, Sartori e Fiorelli (2017), nos estudos para produção de painéis com bagaço de cana-de-açúcar e PU-Mamona, obtiveram valores de MOR, superiores aos encontrados nesta pesquisa, provavelmente, esta diferença está relacionada à geometria das partículas de bagaço de cana que são mais finas e cumpridas do que as de Teca e Seringueira.

Lacombe (2015) utilizando plástico EPS (isopor) como aglutinante para produção de painéis de partículas, obteve 1,92 MPa de MOR, ou seja, um valor muito abaixo aos encontrados no presente trabalho, apesar deste adesivo alternativo garantir

menor inchamento que a resina PU-Mamona, não proporcionou bons resultados de módulo de ruptura.

5.2.4 Módulo de Elasticidade

A Tabela 26 apresenta os valores mínimos de Módulo de Elasticidade (MOE) por tipo de uso (classificação) dos painéis com espessura maior que 13 mm até 20 mm.

Tabela 26 – Requisito mínimo de MOE por tipo de uso.

NBR 14810-2:2018 – Espessura > 13 a 20 mm	
Classificação	Requisito mínimo (MPa)
P2	1600
P3	1950
P4	2300
P5	2400
P6	3000
P7	3100

Fonte: Adaptado ABNT (2013b)

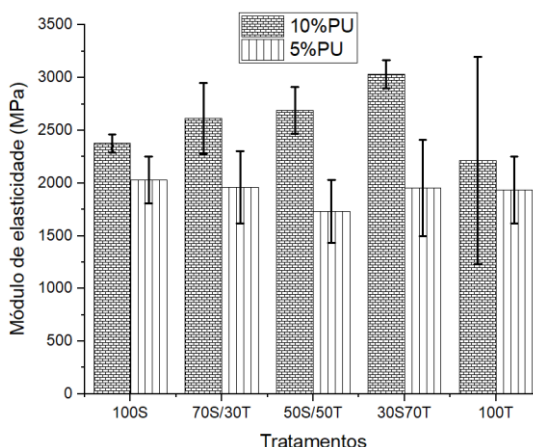
Os valores médios obtidos de módulo de elasticidade, bem como a classificação nas condições de uso que podem ser empregados, estão representados na Tabela 27 e Figura 45.

Tabela 27 – Módulo de elasticidade (MOE).

Tratamento	MOE (MPa)	CV(%)	% de Resina	Classificação
T_{100S}^{10PU}	2375,36	3,57	10	P2, P3 e P4
T_{70S30T}^{10PU}	2611,60	12,88	10	P2, P3, P4 e P5
T_{50S50T}^{10PU}	2688,46	8,21	10	P2, P3, P4 e P5
T_{30S70T}^{10PU}	3032,26	4,31	10	P2, P3, P4, P5 e P6
T_{100T}^{10PU}	3024,67	3,99	10	P2, P3, P4, P5 e P6
T_{100S}^{5PU}	2029,73	10,96	5	P2 e P3
T_{70S30T}^{5PU}	1959,30	17,57	5	P2 e P3
T_{50S50T}^{5PU}	1731,38	17,25	5	P2
T_{30S70T}^{5PU}	1952,93	23,37	5	P2 e P3
T_{100T}^{5PU}	1935,85	16,48	5	P2

Fonte: Acervo da autora.

Figura 45 – Gráfico do Módulo de Elasticidade dos painéis.



Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 27 verifica-se que todos os tratamentos podem ser empregados em pelo menos um tipo de uso. Os tratamentos com 10% de resina apresentaram valores de MOE superiores aos tratamentos com 5% de adesivo.

As propriedades do Módulo de Elasticidade estão relacionadas principalmente com as características da matriz PU-Mamona e, são intensificadas com as características das propriedades físicas e mecânicas de cada tipo de madeira utilizada para produção dos painéis.

As partículas de madeira auxiliam para a maior transferência da tensão mecânica na matriz poliuretana. Portanto, com menor quantidade de PU-Mamona, ocorre um menor recobrimento por parte das partículas e, conseqüentemente, uma redução dos valores do módulo de elasticidade.

Com base nas análises de microscopia eletrônica realizada, verificou-se que com 10% de resina PU-Mamona, o sistema está percolado, ou seja, o poliuretano está sendo o principal responsável pelos valores altos de módulo de elasticidade com o auxílio das partículas. Contudo, nos painéis com 5% de resina o sistema não está percolado e o módulo de elasticidade não está sendo controlado prioritariamente pela matriz poliuretana.

De modo geral os resultados do Módulo de Elasticidade dos painéis aglomerados produzidos com 5% e 10% de resina PU-Mamona deste trabalho, são superiores aos painéis aglomerados estudados por Muzel *et al.* (2015), Wechsler *et al.* (2013) e Juliana, Paridah e Anwar (2012) produzidos com resina ureia formaldeído, entretanto, os painéis do tratamento com 50% de Seringueira e 50% de Teca e aglutinados com

5% de PU-Mamona, apresentaram MOE inferior ao encontrado por Muzel *et al.* (2015) e Juliana, Paridah, Anwar (2012).

Em estudos empregando teores de resina PU-Mamona superiores aos utilizados neste trabalho; Gava *et al.* (2015), Wechsler *et al.* (2013), Cravo, Sartori e Fiorelli (2017) e Fiorelli *et al.* (2012) encontraram valores de MOE inferiores aos do presente trabalho, com exceção dos painéis deste trabalho produzidos com 50% de Seringueira e 50% de Teca e 5% de PU-Mamona, que apresentou MOE inferior ao encontrado por Gava *et al.* (2015).

Nos painéis produzidos por Fiorelli *et al.* (2012) empregando-se UF; nos painéis estudados por Cravo, Sartori e Fiorelli (2017) produzidos com bagaço de cana-de-açúcar empregando-se resina PU-Mamona e nos painéis estudados por Iwakiri *et al.* (2018) produzidos com UF, foram determinados valores de MOE inferiores aos painéis produzidos com 10% de PU-Mamona deste trabalho.

Souza *et al.* (2018), em painéis aglomerados produzidos com partículas de Teca empregando-se ureia formaldeído com resíduos de tinta à base de epóxi, obtiveram valor de módulo de ruptura superiores para os painéis de partículas estudados nesta pesquisa.

Lacombe (2015) utilizando plástico EPS (isopor) como aglutinante obteve valor médio de MOE de 245,19 MPa, ou seja, valor muito abaixo em comparação com os valores mínimos sugeridos pela NBR14810-2:2018 e muito inferiores aos valores de MOE determinados para os painéis produzidos neste trabalho.

5.2.5 Tração Perpendicular

Os valores mínimos para avaliação da Tração Perpendicular (TP) propostos pela norma brasileira, considerando-se o tipo de uso para painéis com espessura maior que 13 mm até 20 mm, estão representados na Tabela 28.

Tabela 28 – Requisito mínimo de TP por tipo de uso.

NBR 14810-2:2018 – Espessura > 13 a 20 mm	
Classificação	Requisito mínimo (MPa)
P2	0,35
P3	0,45
P4	0,35
P5	0,45
P6	0,50
P7	0,70

Fonte: Adaptado ABNT (2013b)

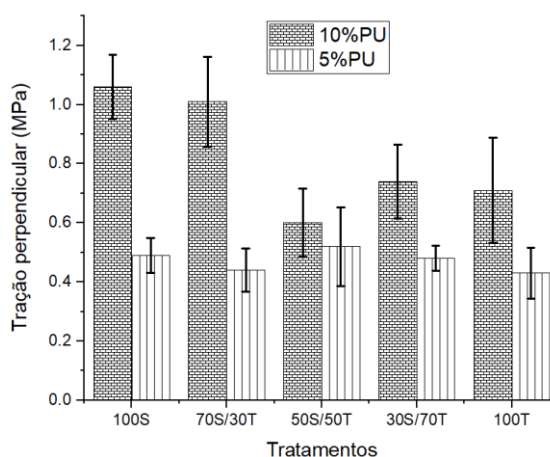
A Tabela 29 e Figura 46 apresentam os valores médios obtidos de Tração Perpendicular, bem como a classificação indicando em quais condições podem ser utilizados os painéis.

Tabela 29 – Resistência à tração perpendicular dos painéis.

Tratamento	TP (MPa)	CV (%)	% de Resina	Classificação
T_{100S}^{10PU}	1,06	10,16	10	P2, P3, P4, P5 e P6
T_{70S30T}^{10PU}	1,01	15,07	10	Todos
T_{50S50T}^{10PU}	0,60	19,25	10	P2, P3, P4, P5 e P6
T_{30S70T}^{10PU}	0,74	17,02	10	Todos
T_{100T}^{10PU}	0,71	24,99	10	Todos
T_{100S}^{5PU}	0,49	12,08	5	P2, P3, P4 e P5
T_{70S30T}^{5PU}	0,44	16,70	5	P2 e P4
T_{50S50T}^{5PU}	0,52	25,70	5	P2, P3, P4, P5 e P6
T_{30S70T}^{5PU}	0,48	8,79	5	P2, P3, P4 e P5
T_{100T}^{5PU}	0,43	20,25	5	P2 e P4

Fonte: Acervo da autora.

Figura 46 – Gráfico com valores de Tração Perpendicular dos painéis.



Fonte: Acervo da autora.

Com base nos valores apresentados na Tabela 29, observa-se que todos os painéis podem ser indicados em pelo menos dois tipos de uso e que a resistência à Tração Perpendicular aumenta com maior porcentagem de resina PU-Mamona.

Os resultados obtidos com os ensaios para determinação da Resistência à Tração Perpendicular para os painéis de todos os tratamentos propostos foram

superiores aos painéis estudados por Juliana, Paridah e Anwar (2012) produzidos com partículas de Seringueira e Kenaf, aglutinados com resina Ureia Formaldeído e também foram superiores aos painéis particulados estudados por Lacombe (2015), produzidos com partículas de Teca e aglutinados com plástico EPS.

Conforme se observa na Tabela 29, os painéis do tratamento com 100% Seringueira e aglutinados com 10% de resina PU-Mamona, apresentaram os melhores resultados de Resistência à Tração Perpendicular, os valores obtidos foram superiores às Resistências à Tração Perpendicular dos painéis produzidos com partículas de Pinus e aglutinados com PU-Mamona estudados por Wechsler *et al.* (2013), bem como, foram superiores aos valores de Resistência à Tração Perpendicular dos painéis produzidos com UF nos estudos desenvolvidos por Fiorelli *et al.* (2012).

Gava *et al.* (2015) utilizaram partículas de Seringueira aglutinadas com PU-Mamona para produção de painéis particulados e obtiveram altos valores de Resistência à Tração Perpendicular. Fiorelli *et al.* (2012) também determinaram altos valores de Resistência à Tração Perpendicular em painéis produzidos com fibra de coco aglutinados com Resina PU-Mamona.

Nos estudos desenvolvidos por Souza *et al.* (2018) em painéis particulados produzidos com 100% de partículas de Teca aglutinados com Resina ureia formaldeído em associação com resíduos de tinta à base de epóxi, também foram encontrados altos valores de resistência à tração perpendicular.

De modo geral, os estudos descritos sobre a produção de painéis particulados empregando espécies alternativas de partículas de madeiras e de resinas, evidenciam e justificam a busca por novas matérias primas para produção de painéis de partículas com melhores propriedades físicas e mecânicas desses produtos derivados de madeira.

A Figura 47 ilustra um ensaio para determinação da resistência à tração perpendicular (TP) no momento da ruptura do corpo-de-prova e o respectivo corpo-de-prova após a ruptura.

Figura 47 – Ruptura do cp no ensaio de Tração Perpendicular.



Fonte: Acervo da autora.

5.3 Considerações Gerais sobre os estudos da primeira etapa.

Os painéis referentes aos tratamentos com 10% de resina PU-Mamona, obtiveram os melhores resultados em comparação aos painéis produzidos com 5% de resina PU-Mamona, entretanto, vale ressaltar que os valores de ensaio determinados para os painéis produzidos com 5% de resina PU-Mamona, podem ser empregados em diversos tipos de utilização de acordo com o documento normativo brasileiro. Os melhores resultados de ensaios obtidos para os painéis produzidos com 10% de resina PU-Mamona, pode ser explicado por meio das análises realizadas com os ensaios de MEV, pois, foi possível verificar uma significativa diferença na eficiência de recobrimento da Resina PU-Mamona nas partículas dos painéis com 10% de resina, consequentemente, propiciando maior envelopamento das partículas de madeira e gerando um sistema percolado.

Nos estudos desenvolvidos por Fiorelli *et al.* (2012) para produção de painéis particulados aglutinados com teores de 10% a 15% de Resina PU-Mamona, foi evidenciado, por meio de análises de MEV, que a resina ocupa lacunas entre as partículas de madeira e, consequentemente, melhora as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

De modo geral, verificou-se que as misturas de partículas entre Seringueira e Teca, quando aglutinadas com resina PU-Mamona, melhoraram as propriedades

físicas e mecânicas dos painéis. Em estudos desenvolvidos por Souza *et al.* (2018), foi evidenciado que partículas de madeira de Teca, em misturas de 75% de Teca com 25% de Pinus, melhoram as propriedades físicas e mecânicas dos painéis em comparação com painéis produzidos com partículas de Pinus.

Com base nos resultados obtidos nos estudos exploratórios, desenvolvidos na primeira etapa deste trabalho, foi considerado para dar continuidades aos estudos referentes à produção e avaliação de painéis com partículas de Seringueira e Teca, o tratamento com 70% de Teca e 30% de Seringueira e, o tratamento com 50% de Teca e 50% de Seringueira, para produção de painéis aglutinando-os com 5% e 10% de resina PU-Mamona. Os dois tratamentos foram selecionados por propiciarem boas propriedades físicas e mecânicas aos painéis, entretanto, para escolha do tratamento com 50% de Teca e 50% de Seringueira foi considerada a facilidade de homogeneização da mistura com a resina PU-Mamona. O tratamento 100% Teca com 10% de PU-Mamona, apesar de apresentar as melhores características físicas e mecânicas, não foi selecionado, pois um dos intuitos do trabalho é a exploração da mistura das espécies.

Foi considerado utilizar, para aglutinação dos painéis, os dois teores de resina PU-Mamona, ou seja, 5% e 10% em relação à massa seca de partículas. Essa escolha objetivou comprovar a percolação de água nos corpos de prova, observada nas análises de MEV e comprovada com os ensaios de Inchamento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SEGUNDA ETAPA DOS ESTUDOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos painéis de partículas produzidos com 70% de Teca e 30% de Seringueira, aglutinados com 5% e 10% de Resina PU-Mamona; 50% de Teca e 50% de Seringueira, aglutinados com 5% e 10% de Resina PU-Mamona, conforme selecionados com os estudos da primeira etapa deste trabalho.

Inicialmente realizaram-se avaliações nas propriedades das partículas de madeira que foram utilizadas para produção dos painéis.

6.1 Avaliação das propriedades das partículas

6.1.1 Teor de umidade e composição granulométrica

Os resultados dos teores de umidade das partículas para os tratamentos estudados estão representados na Tabela 30.

Tabela 30 – Teor de umidade (U) das partículas.

Tratamento	U% amostra 1	U% amostra 2	U% amostra 3	Média	CV (%)
70% Seringueira 30% Teca	10	10,2	10,3	10,2	1,5
50% Seringueira 50% Teca	10,3	10,8	10,5	10,5	2,4

Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 30 verifica-se que os teores de umidade das partículas se encontram em torno de 10%, pois, essa foi a variação da umidade das partículas utilizada nos estudos desenvolvidos na primeira etapa deste trabalho.

6.2 Avaliação das propriedades dos painéis

6.2.1 Densidade

Considerando-se uma densidade nominal de 0,650 g/cm³ para produção dos painéis e com base no ensaio para determinação da densidade, foi possível calcular a densidade média e o módulo máximo de variação da densidade (D%) dos painéis de cada tratamento. Os valores encontrados estão representados na Tabela 31 e

foram comparados com os exigidos pela norma brasileira e com a literatura de referência.

Tabela 31 – Densidade dos painéis.

Cps	10% PU-Mamona				5% PU-Mamona			
	70%T e 30%S		50%T e 50%S		70%T e 30%S		50%T e 50%S	
	D Média (g/cm ³)	D (%)	D Média (g/cm ³)	D (%)	D Média (g/cm ³)	D (%)	D Média (g/cm ³)	D (%)
Valor Mínimo	0,767	3	0,778	4	0,732	2	0,755	2
Valor Máximo	0,816	4	0,841	3	0,755	2	0,792	2
Média	0,787	1	0,813	2	0,743	1	0,774	1
Desvio Padrão	0,0142		0,0209		0,0068		0,0118	
CV (%)	1,81		2,57		0,92		1,53	

Fonte: Acervo da autora.

A NBR 14810-1 (ABNT, 2013), estabelece que a densidade de painéis de partículas de média densidade esteja no intervalo entre 0,551 a 0,750 g/cm³ e apresentem módulo máximo de variação da densidade de 7%. Na Tabela 31, observa-se que apenas o tratamento 70% Teca e 30% Seringueira e com 5% de PU-Mamona, enquadra-se no intervalo proposto pela NBR, ou seja, os demais painéis referentes aos três tratamentos não se enquadram no intervalo estabelecido pela referida norma brasileira. Consequentemente é possível inferir, em função dos resultados obtidos com os ensaios para determinação da densidade, que haverá necessidade de ajuste no valor da densidade nominal para 0,550 g/cm³, buscando-se enquadrar as densidades dos painéis na faixa de densidades recomendadas pela NBR. Vale ressaltar, entretanto, que o módulo máximo de variação da densidade em todos os painéis se apresentou com valores inferiores ao máximo permitido pela norma.

Com o teste de variância realizado nos quatro tratamentos, foram verificadas diferenças significativas entre as porcentagens de misturas de partículas de madeira, entre os dois teores de resina e na interação entre eles. Na Tabela 32, estão apresentadas as análises de variância realizada nos valores de densidade obtidos com os ensaios.

Tabela 32 – Tabela de Análise de Variância das densidades dos painéis.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA	1	7868,0250	7868,0250	36,3790	0,0000
RESINA	1	17347,2250	17347,2250	80,2080	0,0000
MADEIRAxRESINA	1	60,0250	60,0250	0,2780	0,6026
BLOCO	9	1587,2250	176,3583	0,8150	0,6068
ERRO	27	5839,4750	216,2768		
TOTAL	39	32701,9750			
CV(%)	1,89				
MÉDIA GERAL		0,7795	Nº de observações		40

Fonte: Acervo da autora.

Com base na Tabela 32 verifica-se que o coeficiente de variação das densidades dos painéis é de 1,89%, com média geral de 0,7795 g/cm³. Analisando os p-valores obtidos pelo teste F, observa-se que o Fator madeira e o Fator resina, apresentam diferenças significativas, conseqüentemente, foi realizado o teste Tukey para comparação de média dos dois tratamentos de madeira (70% Teca e 30% Seringueira) e (50% Teca e 50% Seringueira) apresentados na Tabela 33, e o teste Tukey para comparação das médias com 5% e 10% de Resina PU-Mamona, apresentado na tabela 34.

Tabela 33 – Teste Tukey para a FV Madeira.

Tratamentos	Médias	Resultado
70%Teca e 30%Seringueira	765,45	a
50%Teca e 50%Seringueira	793,50	b

Fonte: Acervo da autora.

Tabela 34 – Teste Tukey para a FV Resina.

Tratamentos	Médias	Resultado
5%PU-Mamona	758,65	a
10%PU-Mamona	800,30	b

Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 33 verifica-se que a média das densidades dos painéis referentes aos tratamentos com 70% Teca, 30% Seringueira e com 5% e 10% de resina PU-Mamona são diferentes da média das densidades dos painéis do tratamento com 50% Teca, 50% Seringueira e com 5% e 10% de resina PU-Mamona.

Na Tabela 34 verifica-se que a média das densidades com 5% de resina PU-Mamona para os painéis com 70%Teca-30%Seringueira e 50%Teca-50%Seringueira

é diferente da média das densidades com 10% de Resina PU-Mamona para os painéis com 70%Teca-30%Seringueira e 50%Teca-50%Seringueira.

6.2.2 Teor de Umidade

Conforme se observa na Tabela 35 os valores médios determinados para os teores de umidade dos painéis de cada tratamento, estão dentro do intervalo de 5 a 13% estabelecido pela NBR14810-2:2018.

Tabela 35 – Teor de umidade dos painéis.

Cp	10% de Resina PU-Mamona		5% de Resina PU-Mamona	
	70%Teca	50%Teca	70%Teca	50%Teca
	30%Seringueira	50%Seringueira	30%Seringueira	50%Seringueira
	Umidade (%)	Umidade (%)	Umidade (%)	Umidade (%)
Valor Mínimo	7,83	8,37	7,59	8,73
Valor Máximo	8,18	8,80	8,11	9,05
Média	7,97	8,54	7,85	8,95
Desvio Padrão	0,11	0,14	0,17	0,13
CV (%)	1,38	1,64	2,17	1,45

Fonte: Acervo da autora.

Foi realizado o teste de variância no Teor de Umidade dos painéis dos quatro tratamentos e verificado se existe diferença significativa entre as porcentagens de madeira, entre os dois teores de resina e na interação entre eles. A Tabela 36 apresenta o resultado da análise de variância no Teor de Umidade.

Tabela 36 – Tabela de Análise de Variância da variável Teor de Umidade.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA	1	7,876563	7,876563	195,1720	0,0000
RESINA	1	0,083722	0,083722	2,0750	0,1613
MADEIRA*RESINA	1	0,443102	0,443102	10,9800	0,0026
BLOCO	9	0,512272	0,056919	1,4100	0,2326
ERRO	27	1,089638	0,040357		
TOTAL	39				
CV(%)	2,41				
MÉDIA GERAL	8,350250		Nº de observações		40

Fonte: Acervo da autora.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 36, observa-se que o coeficiente de variação do Teor de Umidade é de 2,41% com média geral de 8,35%. Analisando-se os p-valores obtidos pelo teste F, observa-se que o fator madeira e a interação madeira*resina apresentaram diferença significativa, consequentemente, foi realizado o teste Tukey, apresentado na Tabela 37, para comparação de média dos dois tratamentos de madeira com 70%Teca-30%Seringueira e com 50%Teca-50%Seringueira e, em seguida foi realizada a análise do desdobramento de madeira dentro de cada nível de resina e de resina dentro de cada nível de madeira.

Tabela 37 – Teste Tukey para a FV Madeira.

Tratamentos	Médias	Resultado
70%Teca e 30%Seringueira	7,9065	a
50%Teca e 50%Seringueira	8,7940	b

Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 37 verifica-se que a média dos painéis com 70%Teca e 30%Seringueira, 50%Teca e 50%Seringueira, com 5% e 10% de resina PU-Mamona, respectivamente, são diferentes.

Com relação ao desdobramento, primeiramente foi realizado a análise do desdobramento de madeira dentro de cada nível de resina PU-Mamona, conforme está representado na Tabela 38.

Tabela 38 – Tabela de Análise de Variância do desdobramento de madeira dentro de cada nível de resina PU-Mamona.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA /5%PU	1	6,028020	6,028020	149,368	0,0000
MADEIRA /10%PU	1	2,291645	2,291645	56,784	0,0000
Erro	27	1,089638	0,040357		

Fonte: Acervo da autora.

Analisando os p-valores obtidos pelo teste F, pode-se observar diferença significativa do Fator madeira dentro de 5% e 10% de resina. Portanto foi realizado o teste de Tukey para comparação das médias no desdobramento de madeira dentro de 5% e 10% de resina (Tabela 39).

Tabela 39 – Teste Tukey para a FV Madeira dentro de 5% e 10% de resina.

Tratamentos	5% PU-Mamona		10% PU-Mamona	
	Médias	Resultado	Médias	Resultado
70%Teca e 30%Seringueira	7,847	a	7,966	a
50%Teca e 50%Seringueira	8,945	b	8,643	b

Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 39 verifica-se que há diferença significativa entre as médias dos painéis dos tratamentos, ou seja, com a variação das porcentagens de madeiras dos painéis de cada tratamento, verificaram-se diferenças significativas. As diferenças podem estar relacionadas aos teores de umidade das partículas dos painéis aglutinados com 5% de resina PU-Mamona, pois, os painéis com 70%Teca e 30% Seringueira foram produzidos com partículas com 10,2% de umidade, enquanto que, os painéis com 50%Teca e 50%Seringueira foram produzidos com partículas com 10,5% de umidade. O mesmo ocorreu com os painéis produzidos com 10% de resina PU-Mamona.

Em seguida realizaram-se as análises de desdobramento de resina PU-Mamona dentro de cada nível de misturas de partículas de madeira e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Tabela de Análise de Variância do desdobramento de resina dentro de cada nível de misturas de partículas de madeira.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
RESINA% / 70%Teca+30%Seringueira	1	0,070805	0,070805	1,7540	0,1964
RESINA% / 50%Teca+50%Seringueira	1	0,456020	0,456020	11,3000	0,0023
Erro	27	1,089638	0,040357		

Fonte: Acervo da autora.

Com base nos p-valores obtidos pelo teste F, observou-se diferença significativa apenas no Fator resina com partículas de madeira na proporção com 50%Teca e 50%Seringueira, entretanto, para a proporção de partículas de madeira com 70%Teca e 30%Seringueira, não se verificou diferença significativa no teor de umidade, tanto para 5% como para 10% de resina PU-Mamona. Em seguida foi realizado o teste de Tukey para comparação das médias no desdobramento de resina dentro da proporção

de partículas de madeira com 50%Teca e 50%Seringueira, conforme pode ser verificado na Tabela 41.

Tabela 41 – Teste Tukey para a FV Resina dentro do tratamento com misturas de partículas de madeira com 50%Teca e 50%Seringueira.

Tratamentos	Médias	Resultado
10% PU-Mamona	8,643	a
5% PU-Mamona	8,945	b

Fonte: Acervo da autora.

Analisando-se a Tabela 41, observa-se que há diferença significativa entre as médias do tratamento com misturas de partículas de madeira, ou seja, há diferença significativa dentro da mesma proporção de partículas de madeira, mas com diferentes teores de resina. Ressalta-se que foram obtidos os maiores resultados de umidade para as misturas de partículas de madeira com 50%Teca e 50%Seringueira, aglutinadas com 10% de resina PU-Mamona.

6.2.3 Inchamento Após 24h

A Tabela 42 apresenta os valores dos limites máximos de Inchamento propostos pela norma para painéis com espessura maior que 6 mm até 13 mm para cada classificação por tipo de uso dos painéis.

Tabela 42 – Limite máximo por tipo de uso quanto ao inchamento em espessura.

NBR 14810-2:2018 – Espessura > 6mm a 13 mm	
Classificação	Requisito máximo (%)
P2	22
P3	17
P4	16
P5	11
P6	16
P7	10

Fonte: Adaptado ABNT (2013b).

Os resultados médios obtidos de Inchamento após 24h para os tratamentos, bem como a classificação nas condições de uso que podem ser empregados, estão representados na Tabela 43.

Tabela 43 – Inchamento após 24h dos painéis.

Cps	10% de Resina		5% de Resina	
	70%Teca e 30%Sering.	50%Teca e 50%Sering.	70%Teca e 30%Sering.	50%Teca e 50%Sering.
	Inchamento (%)	Inchamento (%)	Inchamento (%)	Inchamento (%)
Valor Mínimo	8,86	4,37	24,71	17,58
Valor Máximo	14,71	10,66	30,42	22,89
Média	10,49	6,83	28,26	20,98
DP	1,81	1,72	1,56	1,71
CV (%)	17,25	25,18	5,52	8,15
NBR 14810-2:2018	P2, P3, P4, P5 e P6	Todos	Nenhum	P2

Fonte: Acervo da autora.

Observa-se na tabela 43 que os painéis com 10% de resina PU-Mamona podem ser empregados em quase todos os tipos de uso quanto à propriedade inchamento após 24 horas, todavia, o tratamento 70% Teca e 30% Seringueira com 5% de resina PU-Mamona, não se enquadra em nenhuma classificação.

Considerando-se os resultados obtidos de Inchamento após 24h, realizou-se o teste de variância e verificou-se que existe diferença significativa entre as porcentagens nas misturas de partículas de madeira, entre os dois teores de resina e, na interação entre eles. Na Tabela 44 observa-se a análise de variância dos valores de inchamento após 24 horas.

Tabela 44 – Análise de Variância dos valores de Inchamento após 24 horas.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA	1	299,482563	299,482563	100,0250	0,0000
RESINA	1	2548,333323	2548,333323	851,1210	0,0000
MADEIRA*RESINA	1	32,670563	32,670563	10,9120	0,0027
BLOCO	9	23,692312	2,632479	0,8790	0,5552
ERRO	27	80,840478	2,994092		
TOTAL	39	2985,019238			
CV(%)	10,40				
MÉDIA GERAL	16,64		Nº de observações		40

Fonte: Acervo da autora.

Com base na Tabela 44 observa-se que o coeficiente de variação dentro do Inchamento é de 10,40% com média geral de 16,64%. Analisando os p-valores obtidos pelo teste F, observa-se que fator madeira, fator resina e a interação madeira*resina

apresentaram diferença significativa, conseqüentemente, foi realizado o teste Tukey para comparação de média entre os tratamentos com as misturas de partículas de madeira com 70%Teca e 30%Seringueira e 50%Teca e 50%Seringueira, conforme apresentado na Tabela 45 e, para comparação das médias dos valores obtidos para painéis produzidos com 5% e 10% resina PU-Mamona, conforme apresentados na Tabela 46. Em seguida realizou-se a análise do desdobramento de madeira dentro de cada nível de resina, e de resina dentro de cada nível de madeira.

Tabela 45 – Teste Tukey para a FV Madeira.

Tratamentos	Médias	Resultado
50%Teca e 50%Seringueira	13,9050	a
70%Teca e 30%Seringueira	19,3775	b

Fonte: Acervo da autora.

Tabela 46 –Teste Tukey para a FV Resina.

Tratamentos	Médias	Resultado
10%PU	8,659500	a
5%PU	24,623000	b

Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 45 verifica-se que as médias dos valores de Inchamento dos painéis de partículas referentes às proporções de madeira são diferentes, bem como observa-se na Tabela 46 que as médias dos valores de Inchamento dos painéis de partículas referentes aos teores de resina, também são diferentes, conseqüentemente, realizou-se, inicialmente a análise do desdobramento das partículas de madeira dentro de cada nível de resina PU-Mamona, conforme apresentado na Tabela 47.

Tabela 47 – Análise de Variância do desdobramento das partículas de madeira dentro de cada nível de resina PU-Mamona.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA com 5%PU	1	264,992000	264,992000	88,505	0,0000
MADEIRA com 10%PU	1	67,161125	67,161125	22,431	0,0001
Erro	27	80,840478	2,994092		

Fonte: Acervo da autora.

Analisando os p-valores obtidos pelo teste F, observa-se que há diferença significativa do Fator partícula de madeira dentro de 5% e 10% de resina, conseqüentemente, foi realizado o teste de Tukey para comparação entre as médias

no desdobramento de partículas de madeira dentro de 5% e 10% de resina PU-Mamona, conforme apresentado na Tabela 48.

Tabela 48 – Teste Tukey para a FV dos tratamentos com partícula de madeira dentro de 5% e 10% de resina PU-Mamona.

Tratamentos	5% de Resina		10% de Resina	
	Médias	Resultado	Médias	Resultado
50%Teca e 50%Seringueira	20,983	a	6,827	a
70%Teca e 30%Seringueira	28,263	b	10,492	b

Fonte: Acervo da autora.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 48, verifica-se que há diferença significativa entre as médias dos valores de Inchamento referentes aos painéis produzidos com misturas de partículas de madeira aglutinadas com 5% e 10% de resina PU-Mamona. Vale lembrar que, os painéis produzidos com 10% de resina PU-Mamona obtiveram os menores valores de Inchamento.

Em seguida foi realizada a análise do desdobramento de resina dentro de cada nível dos tratamentos com misturas de partículas de madeira conforme pode ser observado na Tabela 49.

Tabela 49 – Análise de Variância do desdobramento de resina dentro de cada nível de misturas de partículas de madeira.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
RESINA/ 70%Teca+30%Seringueira	1	1579,042205	1579,042205	527,386	0,0000
RESINA/ 50%Teca+50%Seringueira	1	1001,961680	1001,961680	334,646	0,0000
Erro	27	80,840478	2,994092		

Fonte: Acervo da autora.

Com os valores obtidos dos p-valores pelo teste F, observam-se diferenças significativas do Fator resina dentro dos dois tratamentos, consequentemente, foi realizado o teste de Tukey para comparação das médias no desdobramento de resina dentro dos tratamentos propostos para produção dos painéis de partículas de madeira. As Tabelas 50 e 51 apresentam os resultados obtidos com o teste de Tukey com relação aos tratamentos propostos.

Tabela 50– Teste Tukey para a FV Resina PU-Mamona dentro do tratamento 70%Teca e 30%Seringueira.

Tratamentos	Médias	Resultado
10%PU-Mamona	10,492000	a
5%PU-Mamona	28,263000	b

Fonte: Acervo da autora.

Tabela 51– Teste Tukey para a FV Resina PU-Mamona dentro do tratamento 50%Teca e 50%Seringueira.

Tratamentos	Médias	Resultado
10%PU-Mamona	6,827000	a
5%PU-Mamona	20,983000	b

Fonte: Acervo da autora.

Com base nas Tabelas 50 e 51 verifica-se que há diferença significativa entre os valores de Inchamento dos painéis, tanto com relação às misturas das proporções de madeira, como com relação aos teores de resina utilizados para aglutinação das partículas e produção dos painéis. Entretanto, vale ressaltar que os painéis referentes ao tratamento com 50%Teca, 50%Seringueira e 10% Resina PU-Mamona, apresentaram os menores valores de Inchamento e de acordo com as análises de MEV, evidenciou-se que os menores valores de Inchamentos obtidos estão relacionados ao maior recobrimento das partículas propiciado pelo tratamento com 10% de resina PU-Mamona.

6.2.4 Módulo de Resistência à Flexão Estática

Os valores mínimos de módulo de resistência à flexão estática por tipo de uso dos painéis com espessura maior que 6 mm até 13 mm e maior que 13 mm até 20 mm, estão representados na Tabela 52.

Tabela 52 – Valor mínimo de MOR por tipo de uso.

NBR 14810-2:2018	Espessura > 10 a 13 mm	Espessura > 13 a 20 mm
Classificação	Requisito mínimo para o MOR (MPa)	Requisito mínimo o MOR (MPa)
P2	11	11
P3	15	14
P4	16	15
P5	18	16
P6	20	18
P7	22	20

Fonte: Adaptado ABNT (2013b).

A Tabela 53 apresenta os valores médios obtidos para o MOR, bem como a classificação de uso para painéis particulados.

Tabela 53 – Módulo de resistência à flexão estática (MOR) dos painéis.

Cps	10% de Resina		5% de Resina	
	70%Teca 30%Sering.	50%Teca 50%Sering.	70%Teca 30%Sering.	50%Teca 50%Sering.
	MOR (MPa)	MOR (MPa)	MOR (MPa)	MOR (MPa)
Valor Mínimo	17,77	15,31	10,23	9,28
Valor Máximo	19,87	19,22	13,04	12,19
Média	18,60	17,30	11,77	10,49
Desvio Padrão	0,74	1,43	0,84	0,92
CV (%)	3,98	8,27	7,14	8,77
Classificação NBR 14810-2:2018	P2, P3, P4 e P5	P2, P3 e P4	P2	Nenhum

Fonte: Acervo da autora.

Como pode ser observado na Tabela 53, os painéis com 10% de resina apresentam maior módulo de ruptura, bem como, podem ser classificados em pelo menos três tipos de uso, enquanto que os painéis do tratamento 70%Teca e 30%Seringueira e com 5% de resina PU-Mamona, podem ser utilizado na classificação P2 e, os painéis do tratamento 50%Teca e 50%Seringueira com 5% de resina PU-Mamona não atingem o valor mínimo de MOR exigido pela norma brasileira.

Os valores obtidos de MOR certamente estão relacionados aos teores de resina utilizados para produção dos painéis, pois, verificaram-se diferenças de resultados de MOR entres os teores utilizados.

Verificou-se também que a densidade dos painéis é outro importante parâmetro para avaliação do MOR, pois, nos painéis dos tratamentos dos estudos exploratórios

observou-se que quanto maior a densidade dos painéis, maiores foram os valores determinados para o MOR.

Considerando-se os resultados de MOR, realizou-se o teste de variância entre para verificação da existência de diferença significativa entre os painéis estudados.

Na Tabela 54 está apresentada a análise de variância realizada nos valores de MOR.

Tabela 54 – Tabela de Análise de Variância para os valores de MOR.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA	1	17,635840	17,635840	11,005	0,0026
RESINA	1	477,481000	477,481000	297,964	0,0000
MADEIRA*RESINA	1	0,067240	0,067240	0,042	0,8392
BLOCO	9	6,645600	0,738400	0,461	0,8879
ERRO	27	43,266920	1,602479		
TOTAL	39	545,096600			
CV(%)	8,72				
MÉDIA GERAL	14,520		Nº de observações		40

Fonte: Acervo da autora.

Analisando-se os valores apresentados na Tabela 54, verifica-se que o coeficiente de variação dentro do MOR é de 8,72% com média geral de 14,52 MPa e com os p-valores obtidos pelo teste F, observa-se que Fator madeira e o Fator resina apresentam diferença significativa, conseqüentemente, foi realizado o teste Tukey para comparação de média dos valores de MOR obtidos para as misturas entre partículas de madeira e teores de resina.

Como pode ser observado na Tabela 54, apesar de pela análise estatística não apresentar diferença significativa, dentro do teor de resina 5%, das proporções de madeira 70%T/30%S e 50%T/50%S, uma delas pode ser classificada na categoria P2 e a outra não.

As Tabelas 55 e 56 apresentam os valores obtidos com o teste de Tukey para comparação de média dos dois tratamentos de madeira 70%T/30%S e 50%T/50%S médias com 5% e 10% resina, respectivamente.

Tabela 55 – Teste Tukey para a FV Partículas de Madeira.

Tratamentos	Médias	Resultado
50%Teca e 50%Seringueira	13,856	a
70%Teca e 30%Seringueira	15,184	b

Fonte: Acervo da autora.

Tabela 56 – Teste Tukey para a FV Resina PU-Mamona.

Tratamentos	Médias	Resultado
5%PU-Mamona	11,065	a
10%PU-Mamona	17,975	b

Fonte: Acervo da autora.

Nas Tabelas 55 e 56 observa-se que as médias obtidas no teste Tukey tanto com relação ao FV Partículas de Madeira como com ao FV Resina PU-Mamona são diferentes.

6.2.5 Módulo de Elasticidade

A Tabela 57 apresenta os valores mínimos de Módulo de Elasticidade (MOE) por classificação de tipo de uso dos painéis com espessura maior que 6 mm até 13 mm e maior que 13 mm até 20 mm.

Tabela 57 – Requisito mínimo de MOE por tipo de uso.

NBR 14810-2:2018	Espessura >10 a 13 mm	Espessura > 13 a 20 mm
Classificação	Requisito mínimo (MPa)	Requisito mínimo (MPa)
P2	1800	1600
P3	2050	1950
P4	2300	2300
P5	2550	2400
P6	3150	3000
P7	3350	3100

Fonte: Adaptado ABNT (2013b)

Os valores médios obtidos de MOE, bem como a classificação de acordo com as condições de uso estão representados na Tabela 58.

Tabela 58 – Módulo de elasticidade (MOE) dos painéis.

Cp	10% de Resina		5% de Resina	
	70%Teca 30%Sering.	50%Teca 50%Sering.	70%Teca 30%Sering.	50%Teca 50%Sering.
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOE (MPa)
Valor Mínimo	2299,36	2301,62	1744,21	1830,01
Valor Máximo	2631,88	2682,24	2138,01	2054,74
Média	2468,28	2518,56	1913,89	1933,62
DP	120,15	108,82	123,79	70,68
CV (%)	4,87	4,32	6,47	3,66
Classificação de uso	P2, P3 e P4	P2, P3 e P4	P2	P2

Fonte: Acervo da autora.

Na Tabela 58 observa-se que os painéis com 10% de resina apresentam maior módulo de elasticidade, bem como, podem ser classificados em três tipos de uso, enquanto os tratamentos com 5% de PU-Mamona podem ser utilizados para a classificação de uso P2. E verificou-se que os painéis com maiores densidades apresentaram melhores resultados MOE.

Com base nos resultados obtidos realizou-se o teste de variância entre os valores obtidos com os ensaios para avaliação do MOE dos painéis para verificação de diferenças significativas. Na Tabela 59 está apresentada a análise de variância realizada no MOE dos painéis.

Tabela 59 – Análise de Variância do MOE

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA	1	12254,550422	12254,550422	0,984	0,3299
RESINA	1	3245130,852602	3245130,852602	260,673	0,0000
MADEIRA*RESINA	1	2334,020063	2334,020063	0,187	0,6685
BLOCO	9	83236,117703	9248,457523	0,743	0,6672
ERRO	27	336124,374888	12449,050922		
TOTAL	39	3679079,915678			
CV(%)	5,05				
MÉDIA GERAL	2208,58675		Nº de observações		40

Fonte: Acervo da autora.

Em função das análises realizadas, verificou-se que o coeficiente de variação dentro do MOE é de 5,05% com média geral de 2208,59 MPa e analisando os p-valores obtidos pelo teste F, observa-se que o Fator resina apresenta diferença significativa, conseqüentemente, foi realizado o teste Tukey para comparação de média dos teores de resina utilizados para aglutinação das partículas dos painéis. A Tabela 60 apresenta os resultados obtidos com o teste Tukey.

Tabela 60 – Teste Tukey para a FV Resina.

Tratamentos	Médias	Resultado
5%PU-Mamona	1923,7565	a
10%PU-Mamona	2493,4170	b

Fonte: Acervo da autora.

Com base no teste Tukey verificou-se que os valores médios de MOR são diferentes para os painéis produzidos com 5% e 10% de Resina PU-Mamona.

6.2.6 Tração Perpendicular (TP)

Os valores mínimos de Tração Perpendicular (TP), de acordo com a classificação para uso dos painéis com espessuras variando entre 6 mm a 13 mm, estão apresentados na Tabela 61.

Tabela 61 – Requisito mínimo de TP por tipo de uso.

NBR 14810-2:2018 – Espessura >10 a 13 mm	
Classificação	Requisito mínimo (MPa)
P2	0,40
P3	0,45
P4	0,40
P5	0,45
P6	0,60
P7	0,75

Fonte: Adaptado ABNT (2013b)

A Tabela 62 apresenta os valores médios obtidos com os ensaios de Tração Perpendicular, bem como a classificação para indicando o tipo de a serem utilizados os painéis.

Tabela 62 – Resistência à Tração Perpendicular dos painéis.

Cps	10% de Resina		5% de Resina	
	70%Teca 30%Sering.	50%Teca 50%Sering.	70%Teca 30%Sering	50%Teca 50%Sering
	TP (MPa)	TP (MPa)	TP (MPa)	TP (MPa)
Valor Mínimo	0,96	1,04	0,45	0,52
Valor Máximo	1,19	1,22	0,62	0,67
Média	1,06	1,14	0,52	0,58
Desvio Padrão	0,08	0,06	0,06	0,04
CV (%)	7,55	5,26	11,54	6,90
Classificação	Todos	Todos	P2,P3, P4 e P5	P2,P3, P4 e P5

Fonte: Acervo da autora.

Analisando os valores apresentados na Tabela 62, verifica-se que todos os tratamentos podem ser utilizados em pelos menos 4 classificações e os painéis com 10% de Resina PU-Mamona apresentaram os melhores resultados de TP. Contudo, apesar dos valores de TP dos painéis da segunda etapa terem diminuído em relação aos painéis da primeira etapa; vale ressaltar que a densidade aparente dos painéis

aumentou, considerando-se que, foram definidas densidades nominais de 0,650 g/cm³ para produção dos painéis da segunda etapa e de 0,800 g/cm³ para produção dos painéis da primeira etapa.

Com base nos resultados obtidos de TP, foi realizado o teste de variância em função dos tratamentos. Na Tabela 63 observa os valores obtidos com o teste de variância realizado.

Tabela 63 – Análise de Variância para a Resistência à Tração Perpendicular.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
MADEIRA	1	0,051840	0,051840	12,563	0,0015
RESINA	1	3,025000	3,025000	733,103	0,0000
MADEIRA*RESINA	1	0,001000	0,001000	0,242	0,6265
BLOCO	9	0,028990	0,003221	0,781	0,6357
ERRO	27	0,111410	0,004126		
TOTAL	39	3,218240			
CV(%)	7,81				
MÉDIA GERAL		0,822	Nº de observações		40

Fonte: Acervo da autora.

Com base nos valores obtidos, verifica-se que o coeficiente de variação dentro da Resistência à Tração Perpendicular é de 7,81% com média geral de 0,82 MPa e analisando os p-valores obtidos pelo teste F, observa-se que o Fator madeira e o Fator resina apresentam diferença significativa, consequentemente, foi realizado o teste Tukey para comparação de média dos tratamentos.

Nas Tabelas 64 e 65 são apresentados os valores obtidos com o teste Tukey para comparação das médias dos valores de Resistência a Tração Perpendicular dos painéis considerando-se as misturas de madeira e os teores de resinas utilizados para produção dos painéis, respectivamente.

Tabela 64 – Teste Tukey para a FV Madeira.

Tratamentos	Médias	Resultado
70%Teca e 30%Seringueira	0,786	a
50%Teca e 50%Seringueira	0,858	b

Fonte: Acervo da autora.

Tabela 65 – Teste Tukey para a FV Resina.

Tratamentos	Médias	Resultado
5%PU-Mamona	0,547	a
10%PU-Mamona	1,097	b

Fonte: Acervo da autora.

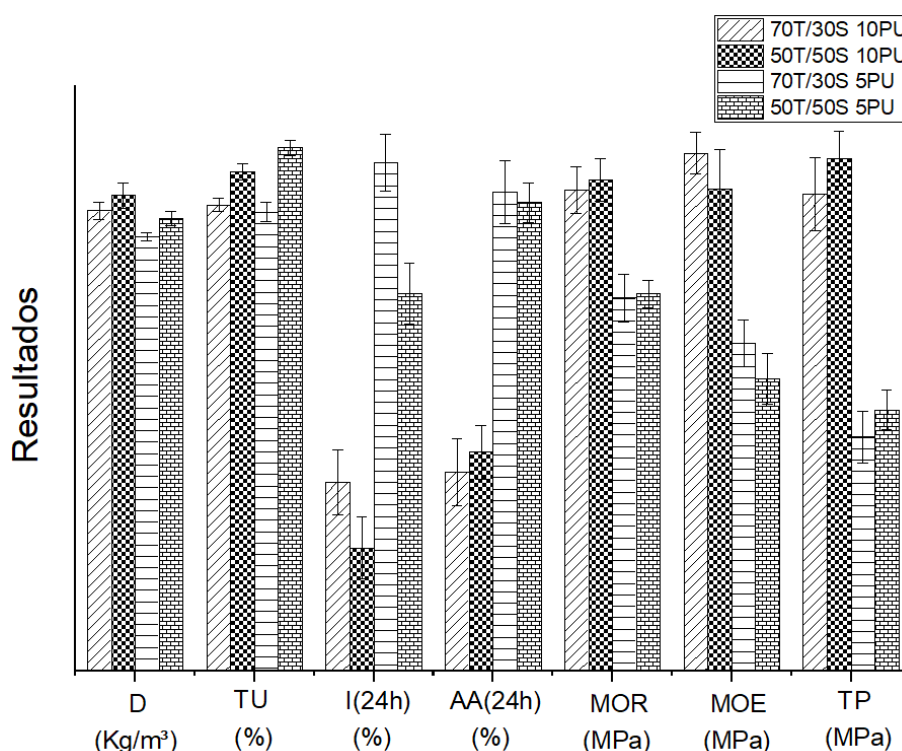
Nas Tabelas 64 e 65 observa-se que as médias dos valores de TP em função das proporções de madeiras utilizadas para produção dos painéis são diferentes, bem como as médias dos valores de TP em função dos teores de Resina PU-Mamona.

6.3 Considerações Gerais

Com a realização deste trabalho observou-se que os estudos exploratórios (primeira etapa) ratificaram os estudos da segunda etapa, pois, verifica-se que os painéis produzidos com 10% de resina PU-Mamona, continuaram evidenciando os melhores valores para as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, mesmo diminuindo-se a densidade nominal de 0,800 g/cm³ para 0,650 g/cm³. Ressalta-se também que nas duas etapas os painéis produzidos geraram sistemas de percolação de água conforme análise de MEV, ou seja, os painéis produzidos com 5% de resina PU-Mamona, o sistema de percolação propiciou maior inchamento, enquanto que os painéis produzidos com 10% de resina PU-Mamona propiciaram menor inchamento de água.

A Figura 48 ilustra um gráfico comparando as propriedades estudadas para produção dos painéis em função dos ensaios realizados na segunda etapa.

Figura 48 – Gráfico das propriedades dos painéis da segunda fase.



Fonte: Acervo da autora.

7 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas para caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, concluiu-se que a utilização de Resina PU-Mamona, com os parâmetros utilizados para produção de painéis com partículas de madeira de Teca e Seringueira, propicia propriedades físicas e mecânicas de acordo com as exigências da NBR14810-2:2018.

Comparando-se os valores obtidos por meio dos ensaios realizados com os valores encontrados em referências nacionais e internacionais, verifica-se que o presente trabalho segue uma tendência semelhante com relação aos trabalhos realizados para produção de painéis de partículas empregando-se resina UF e PU-Mamona.

Pelo ensaio de espectroscopia de infravermelho (FTIR) não foram observados deslocamentos substanciais, no entanto verificou-se alargamento das principais bandas de absorção na comparação das amostras puras com a mistura das partículas com o PU, que poderiam indicar a presença de prováveis ligações de hidrogênio entre os componentes.

Os dois teores de resina utilizados para aglutinação das partículas propiciaram a produção de painéis de partículas de acordo com as classificações de uso propostas no documento normativo brasileiro e, em função das análises de MEV realizadas, verificou-se que os melhores resultados das propriedades físicas e mecânicas foram obtidos nos painéis produzidos com 10% de resina PU-Mamona, pois, esta quantidade de resina propiciou uniformidade de cobertura nas partículas de madeira dos painéis, caracterizando um sistema percolado, enquanto que para os painéis produzidos com 5% de resina PU-Mamona, o sistema se caracterizou como não percolado.

Outro aspecto importante observado foi a verificação da diferença dos valores de densidades dos painéis, pois, considerando-se as densidades nominais propostas na primeira etapa ($0,800 \text{ g/cm}^3$) e na segunda etapa ($0,650 \text{ g/cm}^3$), ou seja, apesar da diminuição da densidade nominal proposta, verificou-se um aumento da densidade aparente dos painéis.

Finalmente, verificou-se que os painéis produzidos com densidades nominais de $0,800 \text{ g/cm}^3$ apresentaram maiores diferença entre as propriedades com relação às proporções de partículas de madeira utilizada, sendo que os painéis com maior porcentagem de Teca apresentaram resultados mais satisfatórios. Porém nos painéis

produzidos com densidades nominais de 0,650 g/cm³, não se verificou muita diferença entre os painéis, inclusive ressalta-se que, para os painéis produzidos 50% de Teca e 50% de Seringueira foram observados menores valores de Inchamento, quando comparados com os painéis produzidos 70% de Teca e 30% de Seringueira.

As avaliações realizadas com os estudos para produção de painéis de partículas homogêneas possibilitam concluir ser viável a utilização de partículas de Seringueira e de Teca, empregando-se 5% e 10% de resina PU-Mamona, para os usos de acordo com as classificações propostas pelo documento normativo brasileiro NBR14610-2:2018, entretanto, de acordo com as análises microscópicas realizadas, concluiu-se ser interessante para os próximos estudos, avaliar a produção de painéis utilizando-se misturas de partículas de Teca e Seringueira com variações de teores de umidade, objetivando-se melhorar o sistema de percolação de água 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.
- ALBUQUERQUE, C. E. C. de. **Interações de Variáveis no Ciclo de Prensagem de Aglomerados**. 2002. 175 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) - Centro de ciências florestais e de madeira, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- ALMEIDA, C. L.; AKCELRUD, L. C. Síntese e caracterização de poliuretanos segmentados contendo blocos de peso molecular controlado: parte 1 preparação e caracterização dos materiais. **Polímeros**, São Carlos, v. 9, n. 2, p.23-29, 1999.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI. **B08.1**: Particleboard. Gaithersburg, 1999.
- ANDRADE, F. de A. **Preparação e caracterização elétrica de filmes de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2002. 43 f. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.
- ARAUJO, 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.
- 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 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 NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**. Brasília, DF, 2013.
- BRODA, Magdalena; POPESCU, Carmen-mihaela. Natural decay of archaeological oak wood versus artificial degradation processes — An FT-IR spectroscopy and X-ray diffraction study. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, Amsterdam, v. 209, p.280-287, 2019.

CHAGAS, S. F. *et al.* Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. **Revista Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 5, n. 2, p.138-150, 2014.

CHEN, J-b.; ZHOU, Q.; SUN, S-q. Direct chemical characterization of natural wood resins by temperature-resolved and space-resolved Fourier transform infrared spectroscopy. **Journal Of Molecular Structure**, [s.l.], v. 1115, p.55-62, 2016.

COSTA, K. L. **Crescimento de Tectona Grandis (TECA) em sistema silvicultural de talhadia composta em Minas Gerais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

CRAVO, J. C. M. *et al.* Painel Aglomerado de resíduos agroindustriais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p.721-730, 30 set. 2015.

CRAVO, J. C. M.; SARTORI, D. I.; FIORELLI, J. Agro-industrial waste composites as components for rural buildings. **Lignocellulosic Fibre And Biomass-based Composite Materials**, [s. l.], p. 13-25, 2017.

DIAS, F M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

EFFENDI, A.; GERHAUSER, H.; BRIDGWATER, A. Production of renewable phenolic resins by thermochemical conversion of biomass: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 12, n. 8, p.2092-2116, 2008.

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.

GAO, Z. *et al.* Biocompatible elastomer of waterborne polyurethane based on castor oil and polyethylene glycol with cellulose nanocrystals. **Carbohydrate Polymers**. Oxford, p. 2068-2075. 2012.

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**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p.124-134, 2016.

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.

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. de 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: 19 jun. 2018.

HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. **Chemical Reviews**, New York, v. 106, n. 9, p.4044-4098, 2006.

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: 26 jun. 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Árvores plantadas**. Brasília, DF, 2017a. Disponível em: <https://iba.org/arvores-plantadas>. Acesso em: 09 maio 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Árvores plantadas**. Brasília, DF, 2017b. Disponível em: <https://iba.org/dados-estatisticos>. Acesso em: 09 maio 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Comunicação**. Brasília, DF, 2018a. Disponível em: <https://iba.org/827-cenarios-iba-exportacoes-do-setor-florestal-representam-5-3-do-valor-vendido-pelo-brasil-e-14-6-do-agronegocio>. Acesso em: 09 maio 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Comunicação**. Brasília, DF, 2018b. Disponível em: <https://iba.org/historico-de-desempenho#paineis-1>. Acesso em: 09 maio 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Painéis de madeira**. Brasília, DF, 2017c. Disponível em: <https://iba.org/paineis-de-madeira>. Acesso em: 09 mai. 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Painéis de madeira**. Brasília, DF, 2017d. Disponível em: <https://iba.org/mdp-medium-density-particleboard-paineis-de-particulas-de-media-densidade>. Acesso em: 09 mai. 2019.

IWAKIRI, S. **A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus**. 1989. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

IWAKIRI, S. *et al.* Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobiumamazonicum* “Paricá” e *Cecropiahololeuca* “Embauba” para a produção de painéis aglomerados. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 303-308, 2010.

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. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 117, p.1-10, 2018.

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

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.

KRONKA, F. J. DO N. Uso potencial da Madeira da Seringueira. **Casa da Agricultura – Heveicultura**, Brasília, DF, ano 13, n. 4, p. 29, 2010.

LACOMBE, J. E. de A. **Painéis de madeira aglomerada produzidos com resíduos de serragem e poliestireno expandido para aplicações na construção civil**. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de arquitetura e urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

LI, H.; NIU, S.; LU, C. Pyrolysis Characteristics of Castor Oil through Thermogravimetric Coupled with Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **Procedia Engineering**, London, v. 205, p. 3705-3710, 2017.

LIM SC, GAN KS, CHOO KT. The characteristics, properties and uses of plantation timbers – rubberwood and Acacia mangium. **Timber Technology Centre (TTO)**, Kepong, v. 26, p. 1–11, 2003.

LIMA, I. L. de; PIMENTEL, M. M.; GARCIA, J. N. Propriedades mecânicas e densidade aparente da madeira de TectonaGrandisLinn. f. (Teca) em função do espaçamento e da posição radial na tora. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 19, n. 2, p. 221-232, 2011.

MACALINO, AD; SALEN, VA; REYES, LQ. Castor Oil Based Polyurethanes: Synthesis and Characterization. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 229, p. 1-6, 2017.

MACEDO NETO, A. A. L. **Variabilidade espacial da fertilidade do solo e produção em cultivo de Teca no nordeste paraense**. 2019. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.

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

MATOS, J. L. M. **Ciclo de prensa em chapas de partículas estruturais “Waferboards”**. 1988. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

MELO, R. R. **Propriedades físico-mecânicas e resistência a biodeterioradores de chapas aglomeradas constituídas por diferentes proporções de madeira e casca de arroz**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MENDES, R. F. *et al.* Efeito da Associação de Bagaço de Cana, do Tipo e do Teor de Adesivo na Produção de Painéis Aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n.1, p. 161-170, 2012.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard: materials**. London: Southern Illinois University, v. 1, 1974.

MOTTA, J. P. *et al.* Resistência natural da madeira de Tectonagrandis em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 8, p. 1393-1398, 2013.

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.

MÜZEL, S. D. **Madeira de Hevea brasiliensis como matéria prima para a produção de chapa de partículas aglomeradas**. 2013. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2013.

NOGUEIRA, I. M. dos S.; LAHR, F. A. R.; GIACON, V. M. Desenvolvimento e caracterização de painéis de partículas aglomeradas utilizando o resíduo do ouriço da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e resina poliuretana derivada do óleo da mamona. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018.

OLIVEIRA, R. C. de. **Produção e avaliação de painéis de partículas de eucalipto e couro com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

OLIVEIRA, R. M. de. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies em madeiras tratadas termicamente**. 2009. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências – Área de concentração: física aplicada) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

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.

PAES, J. B. *et al.* Qualidade de chapas de partículas de *Pinus elliottii* coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 551-558, 2011.

POPESCU, C-M. *et al.* Determination of the effectiveness of a combined thermal/chemical wood modification by the use of FT-IR spectroscopy and chemometric methods. **Journal of Molecular Structure**, London, v. 1200, p. 1-9, 2020.

POPESCU, C-m.; GRADINARIU, P.; POPESCU, M-c. Structural analysis of lime wood biodegraded by white rot fungi through infrared and two dimensional correlation spectroscopy techniques. **Journal of Molecular Structure**, London, v. 1124, p. 78-84, 2016.

RAZERA, D. L. **Estudo Sobre as Interações entre as Variáveis do Processo de Produção de Painéis Aglomerados e Produtos Moldados de Madeira**. 2006. 157 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SANCHES, A. O. **Influência de nanocristais de celulose nas propriedades térmicas, dielétricas e piezoelétricas em compósitos elastoméricos a base de poliuretano**. 2016. 124 f. 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.

SANCHES, Alex Otávio *et al.* Influence of cellulose nanofibrils on soft and hard segments of polyurethane/cellulose nanocomposites and effect of humidity on their mechanical properties. **Polymer Testing**, London, v. 40, p. 99-105, 2014.

SARTORI, D.L. *et al.* Painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 2, p. 171-178, 2012.

SILVA, S. A. M. da. **Chapa de média densidade (MDF) fabricada com poliuretana monocomponente derivada de óleo de mamona – caracterização por método destrutivo e por ultra-som**. 2003. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, S. A. M. da. **Confecção e avaliação de painéis de partículas de madeira de média densidade com aproveitamento de resíduos industriais**. 2016. 92 f. Tese (Livre-Docência em Produtos Engenheirados da Madeira) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF. **Serviço Florestal Brasileiro**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/conhecendo-sobre-florestas>. Acesso em: 09 mai. 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF. **Site**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/cadeia-produtiva>. Acesso em: 09 mai. 2019.

SOUZA, A. M. *et al.* Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. **Journal of Cleaner Production**, London, v. 193, p. 549-562, 2018.

SOUZA, C. S. de. **Caracterização da diversidade genética de acessos do banco de germoplasma de seringueira**. 2018. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Inovação Tecnológica) - Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2018.

SOUZA, M. do C. L. de. **Preparação e Caracterização de compósitos de Polianilina com poliuretana derivada do óleo de mamona**. 2002. 66 f. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

SOZIM, P. C. L. *et al.* Propriedades de painéis aglomerados produzidos com madeiras de *Ligustrum lucidum* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 1, p. 1-8, 2019.

SUGAHARA, E. S. **Avaliação comparativa de painéis aglomerados confeccionados com resíduos lignocelulósicos empregando-se ureia formaldeído e poliuretano de mamona**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018.

TEIXEIRA, D. E. *et al.* Características de chapas de cimento-madeira com partículas de seringueira (*Hevea Brasiliensis* Müell. arg.) tratadas com CCA. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 8, n.1, p. 18-26, 2001.

TEJADO, A. *et al.* Physico-chemical characterization of lignins from different sources for use in phenol–formaldehyde resin synthesis. **Bioresource Technology**, London, v. 98, n. 8, p. 1655-1663, 2007.

TENORIO-ALFONSO, A.; SÁNCHEZ, M. C.; FRANCO, J. M. Synthesis and mechanical properties of bio-sourced polyurethane adhesives obtained from castor oil and MDI-modified cellulose acetate: Influence of cellulose acetate modification. **International Journal of Adhesion And Adhesives**, London, v. 95, p. 1-11, 2019.

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.

TRIANOSKI, R. *et al.* Utilização da madeira de *Cryptomeria japonica* para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 57 – 64, 2013.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p.405-413, 2015.

WECHSLER, A. *et al.* Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Ricinus 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**. 2016. 177 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

ZHANG, Y.; YUAN, Z.; XU, C. Bio-based resins for fiber-reinforced polymer composites. *In*: LAU, A. K.-T.; HUNG, A. P.-Y. **Natural Fiber-reinforced Biodegradable And Bioresorbable Polymer Composites**. London: Elsevier, 2017. p.137-162.

APÊNDICE A – Atribuições, referências e absorções das amostras puras e dos compósitos.

Referência	Atribuições	Absorções das amostras (cm^{-1})												
		Puras			Tratamentos									
		PU (1)	S (2)	T (3)	30S/70T 5PU	30S/70T 10PU	50S/50T 5PU	50S/50T 10PU	70S/30T 5PU	70S/30T 10PU	100S 5PU	100S 10PU	100T 5PU	100T 10PU
Popescuet <i>al. .</i> (2020); Broda e Popescu (2019); Andrade (2002); Souza (2002).	(1) Deformação axial do OH em ligação de hidrogênio intramolecular. (2,3) Ligações inter e intra moleculares de hidrogênio pertencentes aos principais componentes químicos da madeira.	3420	3421	3421	3428	3420	3430	3419	3421	3419	3421	3423	3421	3425
Popescuet <i>al. .</i> (2020); Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramentos vibracionais dos grupos CH advindos de ambos os metilenos aromático –OCH ₃ e alifáticos bem como, dos	2955	2961	2960	2961	2955	2959	2960	2959	2960	2960	2959	2960	2958

	grupos de cadeia lateral metil.													
Li, Niu e Lu (2017); Broda e Popescu (2019).	(1) Vibração de alongamento simétrica e assimétrica de CH_2 . (2,3) Vibrações de estiramento simétricas e assimétricas do grupo metil.	2923	2922	2924	2925	2926	2924	2926	2925	2925	2925	2927	2924	2926
Broda e Popescu (2019); Li, Niu e Lu (2017); Macalino, Salen e Reyes (2017).	(1) vibração de estiramento simétrico e assimétrico do CH_2 da cadeia de hidrocarbonetos do óleo de mamona e HMDI. (2,3) vibrações de estiramento simétricas e assimétricas do grupo metileno.	2853	2853	2857	2857	2857	2854	2858	2854	2856	2854	2857	2853	2856

Souza (2002).	Estiramentos simétricos da ligação C-H com a carbonila.	2731			2728	2728	2722	2732	2729	2728	2734	2730	2730	2727
Souza (2002); Broda e Popescu (2019).	(1) Estiramento da ligação –C=O e da ligação C-O-C presente nos uretanos (2,3) vibrações de estiramento do grupo C=O grupos acetil, carbonil e carboxil (de origem de carboidratos).	1734	1740	1740	1738	1738	1740	1738	1740	1738	1738	1740	1740	1738
Broda e Popescu (2019).	(2,3) C-O conjugados em quininas acoplados ao estiramento C=O de vários grupos e ao estiramento vibracional dos grupos OH da água adsorvida.		1653	1654	1654	1653	1654	1653	1654	1653	1653	1654	1654	1653

Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramento do grupo OH pertencente a água adsorvida.		1634	1636	1633	1634	1636	1634	1636	1634	1634	1635	1636	1634
Souza (2002); Broda e Popescu (2019); Chen, Zhou e Sun (2016); Propescu, Gradinariu e Propescu (2016).	(1) Estiramento da ligação C-N e da deformação da ligação N-H. (2,3) Estiramento das ligações C=C do anel aromático da lignina.	1598	1596	1597	1596	1596	1597	1594	1597	1596	1597	1597	1597	1597
Souza (2002).	(1) Estiramento da ligação C-N e da deformação da ligação N-H.	1541												
Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramento C=C do anel aromático (lignina).	1512	1506	1507	1509	1511	1507	1506	1507	1509	1505	1507	1507	1507

Li, Niu e Lu (2017); Broda e Popescu (2019).	(1) Alcanos - vibração de deformação assimétrica CH_3 . (2,3) Vibração do tipo deformação dos grupos CH_2 presentes na lignina e carboidratos.	1456	1464	1466	1465	1464	1458	1464	1466	1464	1464	1463	1466	1464
Chen, Zhou e Sun (2016); Oliveira (2009).	(2,3) Deformação C-H no plano (celulose) e vibrações do anel (lignina).		1425	1425	1424	1423	1425	1423	1425	1427	1426	1425	1424	1427
Broda e Popescu (2019).	(2,3) Vibrações de estiramento dos grupos C - H presentes na celulose		1331	1332	1328	1329	1331	1327	1331	1331	1336	1330	1331	1321
Popescuet <i>al.</i> . (2020).	(2,3) Modo de flexão C-H na celulose e estiramento C-O na lignina		1259	1261	1261	1259	1261	1263	1262	1259	1261	1260	1262	1262

Popescuet <i>al.</i> . (2020).	(2,3) Ligações C-O em grupos metoxila aromáticos guiacil e grupos acetil em xiloglucanos.		1247	1246	1241	1239	1242	1241	1244	1243	1247	1242	1239	1240
Souza (2002).	(1) Torção e balanço da ligação $-CH_2-$	1222												
Propescu, Gradinariu e Propescu (2016).	(2,3) Estiramento C=O da carbonila, carboxila e grupos acetil, deformação C- H em carboidratos e vibrações de estiramento C- O-C em carboidratos.	1164	1160	1161	1161	1160	1162	1162	1160	1161	1162	1161	1160	1162
Broda e Popescu (2019).	(2,3) Estiramento vibracional das ligações C - O da lignina e carboidratos.	1127	1122	1122	1122	1122	1121	1121	1123	1123	1123	1122	1123	1121

Souza (2002); Propescu, Gradinariu e Propescu (2016).	(1) Estiramento da ligação $\text{C}=\text{O}$ e da ligação $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ presente nos uretanos. (2,3) estiramento vibracional $\text{C}-\text{O}$ em carboidratos.	1055	1053	1056	1055	1054	1055	1056	1055	1054	1054	1054	1056	1055
Oliveira (2009).	(2,3) Deformação CH aromático; deformação $\text{C}-\text{O}$ em álcool e ésteres; estiramento $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ dialquil éteres.		1038	1036	1037	1038	1036	1038	1036	1036	1037	1038	1034	1035
Li, Niu e Lu (2017).	(1) Olefina - Vibração de balanço fora do plano de $\text{C}-\text{H}$.	915												
Popescuet <i>al.</i> (2020).	(2,3) Deformação $\text{C}-\text{H}$ na celulose.		898	899	900	899	898	900	898	899	899	899	901	900

Chen, Zhou e Sun (2016).	(2,3) Flexão fora do plano de Ph-H.	712	714	712	709	712	714	714	712	714	714	708	712	712
Li, Niu e Lu (2017).	(1) CO_2 - vibração de flexão no plano de C = O	669	668	669	667	668	668	668	668	669	668	668	668	668