UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

AMÓS MAGALHÃES DE SOUZA

Produção e avaliação do desempenho de compósitos à base de madeira a partir de insumos
alternativos

São Carlos
2016

AMÓS MAGALHÃES DE SOUZA

Produção e avaliação do desempenho de compósitos à base de madeira a partir de insumos
alternativos

Versão Corrigida
Original na Unidade

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimentos
ao Usuário do Serviço de Biblioteca – EESC/USP.

S729p Souza, Amós Magalhães de
Produção e avaliação do desempenho de compósitos à base de madeira a partir de insumos alternativos / Amós Magalhães de Souza; orientador Francisco Antônio Rocco Lahr. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Pinus sp. 2. Tectona grandis. 3. Painéis aglomerados. 4. Painéis OSB. 5. Polihidroxibutirato (PHB). 6. Resíduo de tinta epóxi. 7. Propriedades físicas e mecânicas. 8. Análise de variância (ANOVA).
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **AMÓS MAGALHÃES DE SOUZA**.

Título da tese: "Produção e avaliação do desempenho de compósitos à base de madeira a partir de insumos alternativos".

Data da defesa: 11/11/2016.

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Francisco Antonio Rocco Lahr**
(Presidente)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Ivaldo de Domenico Valarelli**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Prof. Dr. **André Luis Christoforo**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Profa. Dra. **Rosane Aparecida Gomes Battistelle**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Profa. Dra. **Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira**
(Universidade Federal de Mato Grosso/UFMT)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:

Prof. Titular **Antonio José Felix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Ao meu Deus,
Aos meus pais Manoel e Marli,
A minha noiva Natália,
As minhas irmãs Arlene e Aurenice,
Aos meus sobrinhos Victor e Lara,
Aos meus parentes e amigos,
Dedico com amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pelas oportunidades concedidas.

Aos meus pais Manoel Teodoro de Souza Neto e Marli Magalhães de Souza, por todo amor, carinho e ensinamentos.

À minha querida vizinha Nair Gomes de Oliveira (*in memoriam*), pelo grande exemplo de bondade, humildade e fé.

Ao meu grande mestre e amigo Prof. Dr. Francisco Antônio Rocco Lahr, que nos anos de convivência muito me ensinou, o que contribuiu para meu crescimento científico e intelectual.

À minha amada noiva Natália, que muito me ajudou e incentivou, sempre com muito carinho, amor e companheirismo.

À pesquisadora Maria Fátima (Fati) e ao empresário Ricardo Vicino, pela grande amizade, atenção e apoio.

Aos amigos do LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estrutura de Madeiras: Aparecido (Cidão), Bragatto, Jaime, Arnaldo, Roberto, Silvio e Samuel, que sempre estiveram presentes me aconselhando e incentivando com carinho e dedicação; aos alunos de pós-graduação Felipe, Fabiane e Luciano, Raquel, Caio, Leonardo, Márcio, Marília, Tiago, Marcos, pela amizade e companheirismo.

Aos grandes amigos, familiares, e a todos que colaboraram direta ou indiretamente com a execução deste trabalho;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão da bolsa e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Os meus sinceros agradecimentos!

Só se vê bem com o coração, o essencial é invisível aos olhos.

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

SOUZA, A. M. **Produção e avaliação do desempenho de compósitos à base de madeira a partir de insumos alternativos**. 2016. 131 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

A utilização de produtos provenientes de fontes renováveis e livres de substâncias tóxicas é tendência global, prova disso é o constante aumento da demanda por produtos à base de madeira. Segundo o Forest Products Statistics (2015), a produção mundial de painéis de madeira reconstituída, em 2014, foi de 388 milhões de m³, um aumento de 5,5% em comparação com o ano anterior e um aumento de 34% quando comparado com 2010. No entanto, o setor industrial de painéis de madeira há décadas enfrenta um grande desafio com relação às emissões tóxicas vindas dos adesivos convencionais. Diante destes problemas, a proposta do presente trabalho foi testar a viabilidade da produção de painéis aglomerados e painéis OSB, com significativa redução da emissão de formaldeído, a partir de resíduos de madeira de *Pinus* sp. e *Tectona grandis* (Teca). Neste sentido, buscou-se contribuir para o aumento do conhecimento científico sobre a utilização do polímero natural polihidroxibutirato (PHB) e do resíduo de tinta à base de resina epóxi como adesivos alternativos. Os painéis foram fabricados variando-se os parâmetros de produção para obtenção de melhores condições de processo, sendo estes: densidade baixa, média e alta; teor de adesivo de 20, 30 e 40%; adição de partículas de Teca nas proporções de 0, 25, 50, 75, 100%. O desempenho físico-mecânico dos painéis foi avaliado com base nas normas ABNT NBR 14810 (2013) e ANSI A208.1 (2009). Realizou-se análise de variância (ANOVA) para testar a influência dos fatores individuais (densidade, percentual de adesivo e fração de Teca), além das interações entre tais fatores nas propriedades físico-mecânicas dos painéis. Os resultados apontaram para excelentes propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados de média e alta densidade, tendo resíduo de tinta, principalmente, nas proporções de 30 e 40%. Na maioria dos casos as propriedades de tais painéis foram superiores aos requisitos estipulados pela norma brasileira e pelas internacionais. Assim, ficou confirmada a viabilidade de produção dos aglomerados com pelo menos um dos insumos estudados bem como seu potencial de emprego para as finalidades compatíveis com produtos desta natureza.

Palavras-chave: *Pinus* sp. *Tectona grandis* (Teca). Painéis aglomerados. Painéis OSB. Polihidroxibutirato (PHB). Resíduo de tinta epóxi. Propriedades físicas e mecânicas. Análise de variância (ANOVA).

ABSTRACT

SOUZA, A. M. **Production and performance evaluation of wood-based composites from alternative inputs**. 2016. 131 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The use of products from renewable sources and free of toxic substances is a global trend, the proof is the steady increase in demand for wood-based products. According to the Forest Products Statistics (2015), world production of reconstituted wood panels in 2014 was 388 million cubic meters, an increase of 5.5% compared to the previous year and an increase of 34% compared to 2010. However, the industrial sector of wood panels for decades faces a major challenge with regard to toxic emissions coming from conventional adhesives. Faced with these problems, the purpose of this study was to test the feasibility of production of panels and OSB panels, with significant reduction of formaldehyde emissions from wood waste *Pinus* sp. and teak (Teak). In this sense, we sought to contribute to the increase of scientific knowledge on the use of natural polymer polyhydroxybutyrate (PHB) and residual ink resin-based epoxy as alternative adhesives. The panels were manufactured by varying the production parameters to obtain the best processing conditions, namely: low density, medium and high; resin content of 20, 30 and 40%; adding particles of Teak in proportions of 0, 25, 50, 75, 100%. The physical-mechanical performance of the panels was evaluated based on the standards NBR 14810 (2013) and ANSI A208.1 (2009). Held analysis of variance (ANOVA) to test the influence of individual factors (density, adhesive percentage and fraction Teak), and the interactions among these factors in the physical-mechanical properties of the panels. The results showed excellent physical and mechanical properties of the panels average clusters and high density, and ink residue, mainly in the proportions of 30 and 40%. In most cases the properties of these boards were superior to the requirements set by the Brazilian and international standards. Thus, it was confirmed production of agglomerates with at least one viability of inputs studied as well as their potential for employment for purposes compatible with products of this nature.

Keywords: *Pinus* sp. *Tectona grandis* (Teak). Particleboard. OSB. Polihidroxibutirato (PHB). Physical and mechanical properties. Analysis of variance (ANOVA).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura molecular da resina epóxi à base de bisfenol-A.....	34
Figura 2 - Aplicação da tinta em pó por meio de uma pistola eletrostática.	35
Figura 3 - Polihidroxibutirato (PHB) na forma de grânulos.....	36
Figura 4 - Estrutura química do PHB.	37
Figura 5 - Árvore de Teca.....	38
Figura 6 - Plantação de <i>Pinus taeda</i> juntamente com a textura da madeira.	39
Figura 7 - Classificação dos painéis compósitos de madeira por tamanho de partícula, densidade e processo.....	41
Figura 8 - Composição estrutural dos painéis de madeira aglomerada.	46
Figura 9 - Painéis de partículas de madeira aglomeradas.....	46
Figura 10 - Fluxograma do processo de fabricação de painéis de madeira aglomerada.	47
Figura 11 - Exemplo de aplicação dos painéis aglomerados de média densidade na indústria moveleira.	48
Figura 12 - Orientação das camadas do painel OSB.	50
Figura 13 - Processo industrial de produção de OSB.....	51
Figura 14 - Exemplos de utilização do OSB. a) Tapumes, b) Pisos, c) e d) estruturas de sofá.	53
Figura 15 - Processo de obtenção das partículas de Teca.....	56
Figura 16 - Partículas de madeira <i>Pinus</i> sp e Teca, respectivamente.....	57
Figura 17 - Explosões provocadas pelos gases contidos no interior dos painéis com PHB.....	61
Figura 18 - Resíduo de tinta em pó e a resina ureia-formaldeído (a) Misturados entres os adesivos as partículas de madeira (b).	61
Figura 19 - a) Aferição de massa do adesivo, b) e c) Homogeneização do adesivo e das partículas, d) Pré-prensagem e e)Prensagem a quente.....	62
Figura 20 - Parte dos painéis confeccionados na fase preliminar.....	62
Figura 21 - Organograma de produção que mostra a sequência de produção.	63
Figura 22 - Distribuição e dimensões dos corpos-de-prova retirados em cada painel.	65
Figura 23 - Ensaio de flexão estática.....	66
Figura 24 - Ensaio de resistência ao arrancamento de parafusos face e topo.....	67
Figura 25 - Ensaio de tração perpendicular às faces.	67
Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura.	68

Figura 27 - Corpo de prova (a), cápsula para intrusão do mercúrio (b) e equipamento Micromeritics Poresizer - 9320 (c).....	69
Figura 28 - Rejeitos de madeira transformados em strands.	72
Figura 29 - Geração das partículas, orientação, pré-prensagem.	73
Figura 30 - Gráfico das análises granulométricas das partículas de <i>Pinus</i> e Teca.....	76
Figura 31 - Gráfico com os resultados médios da resistência à tração perpendicular à face, painéis fabricados com resíduo de tinta como adesivo.	77
Figura 32 - Gráfico com os resultados médios da resistência ao arrancamento de parafusos face, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.....	78
Figura 33 - Gráfico com os resultados médios da resistência ao arrancamento de parafusos topo, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.	78
Figura 34 - Gráfico com os resultados médios do MOR na flexão estática, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.	79
Figura 35 - Gráfico com os resultados médios do MOE na flexão estática, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.	79
Figura 36 - Gráfico com os resultados médios dos ensaios de tração perpendicular às faces, painéis fabricados com PHB como adesivo.	80
Figura 37 - Gráfico com os resultados médios dos ensaios de resistência ao arrancamento de parafusos face, painéis fabricados com PHB como adesivo.	81
Figura 38 - Gráfico com os resultados médios dos ensaios de resistência ao arrancamento de parafusos topo, painéis fabricados com painéis PHB como adesivo.	81
Figura 39 - Gráfico com os resultados médios dos módulos de resistência (MOR) na flexão estática, painéis fabricados com painéis tendo PHB como adesivo.....	82
Figura 40 - Gráfico com os resultados médios dos módulos de elasticidade (MOR) na flexão estática, painéis fabricados com painéis tendo PHB como adesivo.....	82
Figura 41 - Valores médios da densidade dos painéis.	85
Figura 42 - Valores médios do inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água.	86
Figura 43 - Valores médios do inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água.	87
Figura 44 - Valores médios da absorção de água após 2 horas de imersão em água.....	88
Figura 45 - Valores médios da absorção de água após 24 horas de imersão em água.....	89
Figura 46 - Gráfico de interação entre fatores para a densidade.....	92
Figura 47 - Gráfico de interação entre fatores para o IE2h.....	93

Figura 48 - Gráficos de interação entre fatores para o inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água.	94
Figura 49 - Valores médios da resistência na tração perpendicular às faces dos painéis.	95
Figura 50 - Valores médios do módulo de elasticidade na flexão estática.	97
Figura 51 - Valores médios do módulo de resistência na flexão estática.	97
Figura 52 - Valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de face.	99
Figura 53 - Valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de topo.	100
Figura 54 - Gráfico de interação entre fatores para a resistência na tração perpendicular.	103
Figura 55 - Gráfico de interação entre fatores para o módulo de elasticidade (a) e para o módulo de ruptura (b).	104
Figura 56 - Morfologia das superfícies das amostras, A = amostra com 100% <i>Pinus</i> e B = amostra com 100% Teca.	105
Figura 57 - Morfologia das superfícies das amostras: A = amostra com 75% de teca, B = aproximação do círculo tracejado da imagem A, C = amostra com 100% de teca e D aproximação do círculo tracejado da imagem C.	106
Figura 58 - Morfologia das superfícies das amostras: A e C = interfaces entre a matriz e uma partícula rompida, B = aproximação do círculo tracejado da imagem A e D aproximação do círculo tracejado da imagem C.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Delineamento experimental da produção dos painéis com resíduo epóxi.....	58
Tabela 2 - Delineamento experimental da produção dos painéis com PHB	59
Tabela 3 - Ensaios realizados e a quantidade de corpos de prova retirada em cada painel.....	64
Tabela 4 - Tratamentos delineados do planejamento experimental.	70
Tabela 5 - Delineamento experimental da produção dos painéis OSB.	73
Tabela 6 - Teor de umidade das partículas de <i>Pinus</i> sp. e Teca	75
Tabela 7 - Teor de umidade dos painéis de partículas.....	84
Tabela 8 - Resultados do inchamento em espessura após 2 e 24 horas referentes a outros estudos.	87
Tabela 9 - Resultados absorção de água após 2 e 24 horas referentes a outros estudos.....	89
Tabela 10 - Resultados dos testes de validação da ANOVA para as propriedades físicas.....	90
Tabela 11 - Resultados da ANOVA referente ao planejamento experimental das propriedades físicas.	91
Tabela 12 - Resultados do teste de Tukey para as propriedades ρ , IE2h e IE24h e Ab2h e Ab24h, referente ao planejamento experimental.	91
Tabela 13 - Resultados de tração perpendicular às faces referentes a outros estudos.....	96
Tabela 14 - Resultados dos módulos de resistência e elasticidade referentes a outros estudos.	98
Tabela 15 - Resultados de resistência ao arrancamento de parafusos referentes a outros estudos.	101
Tabela 16 - Resultados dos testes de validação da ANOVA para as propriedades mecânicas.	101
Tabela 17 - Resultados da ANOVA para o planejamento fatorial para propriedades mecânicas.	102
Tabela 18 - Resultados do teste de Tukey para as propriedades TP, MOE, MOR, RAPf e RAPt referente ao planejamento experimental.	102
Tabela 19 - Propriedades porosimétricas das amostras analisadas.....	108
Tabela 20 - Propriedades porosimétricas encontradas em outros estudos.....	108
Tabela 21 - Classificados dos painéis de partículas de média densidade (NBR 14810:2 (2013) e os valores médios encontrados nos tratamentos estudados.....	112
Tabela 22 - Valores médios das propriedades físicas dos painéis fabricados.	127

Tabela 23 - Valores médios das propriedades mecânicas dos painéis fabricados.	129
Tabela 24 - Menores e maiores valores do coeficientes de variação (Cv) para as propriedades físicas e mecânicas considerando os 45 tratamentos delineados.....	131

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 OBJETIVOS	31
2.1 OBJETIVO GERAL.....	31
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
3.1 ADESIVOS ALTERNATIVOS	33
3.1.1 Resíduo de tinta à base de resina epóxi	33
3.1.2 Polihidroxibutirato (PHB)	35
3.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS MADEIRAS UTILIZADAS	37
3.2.1 Madeira de <i>Tectona grandis</i> (Teca)	37
3.2.2 Madeira de <i>Pinus</i> sp.	39
3.2.3 Resíduos de madeira.....	40
3.3 PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA.....	40
3.3.1 Generalidades	40
3.3.2 Fatores que influenciam as propriedades dos painéis de partículas de madeira	42
3.3.2.1 Espécies de madeira.....	42
3.3.2.2 Teor de umidade das partículas	42
3.3.2.3 Geometria, orientação e composição das partículas.....	43
3.3.2.4 Tipo de adesivo.....	43
3.3.2.5 Tempo, temperatura e pressão específica de prensagem.....	44
3.3.2.6 Densidade do painel.....	45
3.3.3 Painéis aglomerados	45
3.3.3.1 Generalidades sobre os painéis aglomerados	45
3.3.3.2 Produção industrial dos painéis aglomerados.....	47
3.3.3.3 Adesivos empregados na produção dos painéis aglomerados	47
3.3.3.4 Aplicações dos painéis aglomerados	48
3.3.4 Painéis OSB.....	49
3.3.4.1 Generalidades sobre os painéis OSB.....	49
3.3.4.2 Produção industrial dos painéis OSB	50
3.3.4.3 Adesivos empregados na produção dos painéis OSB.....	51
3.3.4.4 Aplicações dos painéis OSB.....	52

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
4.2 METODOLOGIA	55
4.2.1 Produção dos painéis aglomerados.....	56
4.2.1.1 Obtenção e caracterização das partículas.....	56
4.2.1.1.1 Geração das partículas	56
4.2.1.1.2 Propriedades físicas das partículas.....	57
4.2.1.3 Considerações sobre o estudo preliminar.....	60
4.2.1.4 Confeção dos painéis principais.....	61
4.2.1.5 Caracterização dos painéis principais	63
4.2.1.5.1 Obtenção dos corpos-de-prova.....	64
4.2.1.5.2 Propriedades físicas dos painéis.....	65
4.2.1.5.3 Propriedades mecânicas dos painéis	66
4.2.1.5.4 Demais Análises.....	67
4.2.1.6 Análise Estatística	69
4.2.2 Produção dos painéis OSB	72
4.2.2.1 Obtenção das partículas	72
4.2.2.2 Estudos preliminares	72
4.2.2.3 Considerações sobre o estudo preliminar.....	74
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS PARTÍCULAS	75
5.1.1 Teor de umidade.....	75
5.1.2 Análise de granulométrica	76
5.2 ESTUDOS PRELIMINARES.....	77
5.2.1 Painéis aglomerados tendo o resíduo de tinta à base de resina epóxi como adesivo	77
5.2.2 Painéis aglomerados tendo Polihidroxibutirato (PHB) como adesivo.....	80
5.3 ENSAIOS PRINCIPAIS	83
5.3.1 Propriedades físicas dos painéis aglomerados	83
5.3.1.1 Teor de umidade.....	84
5.3.1.2 Densidade.....	85
5.3.1.3 Inchamento em espessura.....	86
5.3.1.4 Absorção de água	88
5.3.1.5 Análise estatística das propriedades físicas	90
5.3.2 Propriedades mecânicas dos painéis aglomerados.....	94

5.3.2.1 Resistência na tração perpendicular às faces	95
5.3.2.2 Módulo de resistência e módulo de elasticidade na flexão estática	96
5.3.2.3 Resistência ao arrancamento de parafusos	99
5.3.2.4 Análises estatísticas das propriedades mecânicas	101
5.4 DEMAIS ANÁLISES	104
5.4.1 Análise de microscopia eletrônica de varredura.....	104
5.4.2 Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	107
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	109
REFERÊNCIAS	115
APÊNDICES	127

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos sustentáveis, juntamente com os incentivos dos programas de manejo florestal e reflorestamento, têm proporcionado significativa expansão das áreas de florestas plantadas no Brasil. Além disso, a procura por matéria prima para celulose, energia e o próprio mercado do carbono vêm incentivando a ampliação da cobertura arbórea em todo o mundo (HOLT et. al., 2016).

O anuário estatístico de produtos florestais, publicado pela Organização das Nações Unidas, em 2015, mostra que a produção mundial de madeira em 2013 deu o maior salto desde a crise econômica global de 2008-2009 e os principais produtos madeireiros, tais como toras, madeira serrada, painéis à base de madeira, papel e celulose tiveram incremento de demanda que levou à superação dos níveis pré-recessão de 2007 (FOREST PRODUCTS STATISTICS, 2015). Tomando como exemplo a madeira em tora (destinada para produção de madeira serrada, laminados, painéis etc), sua produção industrial mundial em 2014 foi de 1837 milhões de metros cúbicos (m³). Este número representa aumento de 2,3% em comparação com 2014 e de 7,9% em comparação com 2010, de acordo com o Forest Products (2014).

Associado ao aumento na produção de toras está um significativo crescimento nas áreas de florestas certificadas. Na América Latina, a expansão do plantio de árvores vem sendo observado desde 2012 e chegou a 16,3 milhões de hectares em 2014. Dentre os países sul-americanos, o Brasil se destaca devido à sua grande extensão territorial e ao clima favorável, que o coloca entre os cinco maiores produtores de toras do mundo, com quase 150 milhões de m³ em 2014. A produção de toras de madeira no Brasil tem crescido continuamente e uma parte significativa vem de florestas plantadas (FOREST PRODUCTS STATISTICS, 2015).

Entre tantas espécies cultivadas e comercializadas no território brasileiro, o gênero *Pinus* apresenta a segunda maior área plantada, atualmente ultrapassa 2 milhões de hectares (IBGE, 2016). Este gênero exótico possui dezenas de espécies bem sucedidas no Brasil, sendo as mais plantadas: *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa* e *Pinus tecunumanii* (CIFLORESTAS, 2016).

A Teca (*Tectona grandis*) é outra espécie exótica, também cultivada no Brasil, que merece destaque pela constante expansão das áreas plantadas, atualmente próximas a 100 mil hectares. Esta madeira é considerada nobre pelo setor moveleiro, possui alto valor comercial e encontra no Brasil condições climáticas favoráveis para o seu desenvolvimento (NASCIMENTO et. al., 2016). As plantações de Teca são localizadas, predominantemente, na

região centro oeste e o manejo ocorre em ciclos de corte de 25 anos, diferentemente dos demais países de cultivo, onde esse ciclo pode variar de 60 a 80 anos (REVISTA MADEIRA, 2013).

Conforme têm se observado, o uso da madeira oriunda de florestas plantadas, para fins comerciais, vem ajudando cada vez mais a suprir a demanda por matéria-prima sustentável. Por outro lado, o processamento da madeira gera uma enorme quantidade de rejeitos (os quais são decorrentes do processo primário e possuem maiores dimensões, tais como costaneiras, recortes, toras danificadas, lascas, etc.) e resíduos que possuem pequenas dimensões, como pó de serra, maravalhas, serragem, etc (SOUZA, 2012).

Percebe-se a situação quando se analisa, por exemplo, o processo de desdobro primário uma tora de madeira de *Pinus taeda*, cujo rendimento pode variar de 37 a 63%, dependendo do tipo de desdobro e dos equipamentos utilizados (MURARA JUNIOR; ROCHA; TRUGINHA, 2013). Genericamente, podem-se estender estes valores para árvores das demais espécies, uma vez que os processos de desdobro são semelhantes (BIASI; ROCHA, 2007).

No Brasil, um levantamento feito pelo Ministério do Meio ambiente e publicado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2011), estimou que a quantidade de resíduos gerada na cadeia produtiva da madeira ultrapassa 85 milhões m³/ano, isso levando em conta as etapas de colheita e processamento mecânico.

Os resíduos de madeira podem causar diversos riscos socioambientais, como contaminação do solo, assoreamento e contaminação dos rios e poluição do ar devido a emissão de grande volume de CO₂ na atmosfera com sua queima. Deste modo, a busca por alternativas sustentáveis para o aproveitamento destes resíduos é necessária e urgente. Neste sentido, a produção de painéis de madeira reconstituída a partir de resíduos vem se mostrando uma opção que merece destaque. Diversos estudos têm demonstrado que a produção de painéis utilizando resíduo de serraria como matéria-prima é viável e pode ajudar a atender a crescente demanda por painéis de madeira (SOUZA, 2012; VALARELLI, et al. 2015; CHRISTOFORO, et al. 2015).

Os painéis de partícula de madeira possuem uma grande representatividade no mercado internacional. O MDP (Aglomerado de média densidade), por exemplo, é o painel de madeira reconstituída mais produzido e consumido no mundo. Sua produção em 2013, só na Europa e nos Estados Unidos da América do Norte (EUA), foi de 35,5 e 9,9 milhões de m³, respectivamente. Já a produção do OSB, em 2013, foi de 6 milhões de m³ na Europa e aproximadamente 45 milhões de m³ nos EUA (FOREST PRODUCTS, 2014). No Brasil, segundo Vidal e Hora (2014), a fabricação de MDP envolve diferentes empresas e a produção em 2014 foi acima de 3 milhões de m³. Por outro lado, de acordo com Souza (2012), a

empresa Louisiana-Pacific Corporation, localizada em Ponta Grossa-PR, é a única empresa que produz OSB e sua capacidade é de 350 mil m³ anual.

O setor industrial de painéis de madeira tem crescido para atender a grande demanda, no entanto, há décadas enfrenta um grande desafio com relação às emissões tóxicas vindas dos adesivos convencionais. Sabe-se que a resina ureia-formaldeído tem sido o principal agente de ligação dos painéis. Todavia, a emissão de formaldeído provocada por esta resina, especialmente durante o processo de fabricação, é explicitamente indesejada devido à toxidez desta substância (LIU; ZHU, 2014; BELINI et. al., 2015). Numerosos estudos têm verificado e constatado que em curto prazo a exposição a esta substância pode causar irritação nos olhos, nariz e garganta. Nos casos mais graves, a exposição crônica pode provocar doenças respiratórias e até mesmo câncer (LIANG; LV; YANG, 2016a, 2016b).

Diante destes problemas, a proposta do presente trabalho foi testar a viabilidade da produção de painéis aglomerados e painéis OSB, com significativa redução da emissão de formaldeído, a partir de resíduos de madeira de *Pinus* sp. e Teca. Neste sentido, buscou-se contribuir para o aumento do conhecimento científico sobre a utilização do polímero natural Polihidroxibutirato (PHB) e do resíduo de tinta à base de resina epóxi como adesivos alternativos.

O polihidroxibutirato (PHB) é de uma família de materiais plásticos biodegradáveis e renováveis, com propriedades que abrangem a gama de materiais elastoméricos de filmes moles e materiais cristalinos, permitindo o seu uso numa grande variedade de aplicações (ABE e DOI, 2002; FENG et al., 2002; SATKOWSKI et al., 2002; REDDY, et al., 2012).

Em contrapartida, a tinta à base de resina epóxi, derivada do petróleo, é um plástico termorrígido muito utilizado como recobrimento de produtos industriais como, eletrodomésticos, tubos de aço para oleodutos, automóveis etc (GUIA TECNICO, 2012). Dentre as provenientes da resina epóxi, as tintas em estado sólido, especificamente em pó, apresentam fácil aplicação e manutenção, boa relação custo-benefício e alto rendimento. Todavia, dada à alta produção, especialmente de veículos e eletrodomésticos, os resíduos gerados podem chegar a quantidades expressivas (WEG, 2008).

Neste contexto, em que emissão de gases tóxicos e a geração de resíduos são notáveis, a pesquisa por alternativas por meio de estudos se faz necessária. O intuito de obter produtos livres de formaldeído, a partir de adesivos alternativos, associado ao aproveitamento de resíduo de madeira pode contribuir para o aumento do rendimento do setor madeireiro, além de evitar o acúmulo desse resíduo na natureza ou sua queima e consequente emissão de CO₂ na atmosfera.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal foi analisar a viabilidade do emprego do polímero natural polihidroxibutirato - PHB e do resíduo de tinta à base de resina epóxi como adesivos na produção de painéis aglomerados e painéis OSB, a partir de rejeitos/resíduos da madeira das espécies de *Pinus* sp. e de *Tectona grandis* (Teca).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- verificar a viabilidade do emprego do polímero natural Polihidroxibutirato - PHB e do Resíduo de tinta à base de resina epóxi como adesivo, bem como sua compatibilidade com os insumos empregados na produção dos painéis em questão;
- verificar a viabilidade da utilização de resíduos com pequenas granulometria, tais como serragem grossa, aparas, cavacos, na confecção partículas de *Pinus* sp. e *Tectona grandis* empregadas na produção de painéis aglomerados de baixa, média e alta densidade.
- verificar a viabilidade do emprego de rejeitos de processamento primário, como pontas de vigas/pranchas/tábuas, recortes etc., na fabricação strands (tiras de madeira) na produção de painéis OSB de baixa, média e alta densidade.
- verificar os parâmetros de processo de produção dos painéis, em relação à quantidade de partículas, teor de adesivo, tempo e temperatura de prensagem, de maneira a alcançar condições que permitam a obtenção de painéis em conformidade com os valores estabelecidos pela ABNT.

Deste modo, dada a originalidade do tema, espera-se aperfeiçoar a tecnologia e desenvolver o conhecimento relativo ao assunto, disponibilizando-o para a comunidade científica e para o setor produtivo do segmento madeireiro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, a revisão da literatura abrange os tópicos: Adesivos alternativos; Principais características das madeiras utilizadas e Painéis de partículas de madeira reconstituída, em especial os painéis aglomerados e OSB.

3.1 ADESIVOS ALTERNATIVOS

Um dos maiores problemas enfrentados atualmente pelas indústrias produtoras de painel à base de madeira é a emissão de formaldeído causada pelos principais adesivos empregados (BELINI et. al., 2015). Esta substância causa sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente (LIANG; LV; YANG, 2016a, 2016b).

Dada a importância do tema, a União Europeia, os EUA, a China e o Japão, a fim de controlar a emissão de formaldeído, já dispõem de legislação que limita a emissão durante o processo de fabricação dos produtos à base de madeira. Com isso, as indústrias têm reduzido tais emissões, buscando melhorar a qualidade do ar no interior das fábricas. No Brasil não é diferente, atualmente exige-se uma forte redução desse tipo de emissão na fabricação dos painéis. Agindo conjuntamente, tantos os fabricantes quanto os pesquisadores têm investido esforços para reduzir a emissão de formaldeído por vários meios (BELINI et al., 2015).

3.1.1 Resíduo de tinta à base de resina epóxi

As resinas epóxi são comercializadas desde os anos de 1930 e a resina mais comum é conhecida como diglicidil éter de bisfenol-A (Figura 1), obtida basicamente pela reação de condensação entre a epícloridrina e o bisfenol-A (SILAEX, 2012; PINTO, 2012). As resinas epóxi são convertidas em polímeros termorrígidos por um processo chamado reação de cura pela ação de endurecedores (agentes de cura). A mencionada reação pode ser realizada tanto à temperatura ambiente como a altas temperaturas, dependendo dos produtos iniciais utilizados no processo ou das propriedades desejadas do produto final (ALMEIDA, 2005).

Figura 1- Estrutura molecular da resina epóxi à base de bisfenol-A.
Fonte: Silaex (2012)

As resinas epóxi são caracterizadas pela sua viscosidade, ponto de fusão, cor, número de hidroxilas, porcentagem de insaturação, distribuição de peso molecular e outros, por meio de procedimentos padronizados (ALMEIDA, 2005). São utilizadas para uma vasta gama de aplicações como: tintas anticorrosivas, revestimentos internos de embalagens de bebidas, placas de circuito impresso, encapsulamentos de componentes eletrônicos, pisos industriais, pranchas de surfe etc (SILAEX, 2012).

As tintas fabricadas com estas resinas, muito difundidas no Brasil, são de alto desempenho, principalmente as tintas em pó utilizadas na pintura eletrostática. Este processo oferece muitas vantagens, entre elas a possibilidade de coletar e reciclar o resíduo gerado, pois o mesmo dispensa o uso de solventes, consequentemente oferece menos danos à saúde e ao meio ambiente (WEG, 2008).

De acordo com a CETEP (2016) existem diversas formas de utilização da pintura eletrostática a pó, em cada caso, cada tinta é ideal para determinados tipos de produtos. As três técnicas mais utilizadas são: leito fluidizado que envolve temperatura, leito fluidizado eletrostático e pulverização eletrostática.

Na técnica do leito fluidizado que envolve temperatura, injeta-se ar o suficiente para que a tinta, um pó muito fino, fique suspensa e se comporte como um fluido, já o objeto a ser pintado deve estar pré-aquecido para que ocorra a fusão da tinta em contato com o mesmo. As outras técnicas, leito fluidizado eletrostático e pulverização eletrostática, baseiam-se na atração das cargas opostas (positiva e negativa). Nestes casos, a tinta é carregada eletrostaticamente e lançada sobre o objeto aterrado, a partir desse momento o campo elétrico desempenha a função de atraí-las. Em seguida, em ambos os casos, o objeto segue para uma estufa onde ocorre a fusão da tinta (CETEP, 2016). A aplicação da tinta em pó em um objeto por meio de uma pistola eletrostática é mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Aplicação da tinta em pó por meio de uma pistola eletrostática.
Fonte: Tintapo (2016)

Segundo Weg (2008), a utilização das técnicas eletrostáticas com tinta em pó garante alto rendimento ao processo, todavia, devido à alta produtividade, a quantidade de resíduo ainda sim pode ser expressiva.

O resíduo de tinta à base de resina epóxi é a somatória das suas pequenas frações que não aderiram ao objeto durante o processo e se depositaram no solo da câmara de pintura. Conforme mencionado, a reação de cura ocorre nas etapas posteriores em estufas, ou seja, o resíduo em questão pode, por meio da temperatura, fundir-se e desempenhar a função de agente ligante para painéis à base de madeira (WEG, 2008). Cabe ressaltar que ausência de estudos semelhantes, nos principais bancos de dados disponíveis, atesta a originalidade do presente trabalho.

3.1.2 Polihidroxibutirato (PHB)

A produção de biomateriais renováveis de alta qualidade é necessária para diminuir a dependência mundial do petróleo. Neste contexto, diversas empresas produzem bioplásticos no mundo, parte desta produção vem de substâncias obtidas diretamente da agricultura e outra envolve a participação de microrganismos vivos, ou seja, são produzidos por processo fermentativo. Porém, ambos os casos apresentam a característica de biodegradabilidade (MACHADO, 2008).

De acordo com Quental et al. (2010), o Polihidroxibutirato (PHB) e seus copolímeros são produzidos naturalmente por bactérias a partir de fontes renováveis de energia, além disso são biodegradados por uma enorme quantidade de bactérias e fungos presentes na natureza. Ainda segundo os mesmos autores, a biodegradabilidade por si só

não pode ser o único atrativo no PHB, do mesmo modo para qualquer outro polímero biodegradável. A capacidade de se permanecer no mercado depende também de atrativos como desempenho satisfatório, preços competitivos capacidade de suprir a demanda.

No Brasil, segundo Silva et al. (2007), o impulso para o estudo a respeito do PHB ocorreu na década de 1990, quando teve início o projeto "Produção de plásticos biodegradáveis a partir de cana-de-açúcar, por via biotecnológica", por meio de uma parceria entre Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a Cooperativa dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar) e o Instituto de Ciências Biomédicas (ICB) da Universidade de São Paulo (USP).

Segundo Vasconcelos (2012), o processo de produção do PHB começa no cultivo de bactérias da espécie *Alcaligenes eutrophus* em biorreatores, nos quais estas são alimentadas com açúcares da cana, principalmente sacarose. Em seu metabolismo, os micro-organismos ingerem os açúcares e os transformam em grânulos (milimétricas bolinhas) intracelulares que são, na verdade, poliésteres. O Polihidroxibutirato (PHB) na forma de grânulos é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Polihidroxibutirato (PHB) na forma de grânulos.
Fonte: Revista Fapesp (2012)

As propriedades do PHB permitem enquadrá-lo na gama de materiais elastoméricos, desde filmes moles a materiais cristalinos, adequados a uma grande variedade de aplicações industriais (ABE e DOI, 2002; FENG et al., 2002; SATKOWSKI et al., 2002; REDDY, et al., 2003).

De acordo com Ghaffar (2002), o PHB é um termoplástico que possui propriedades físicas e mecânicas comparáveis às de polipropileno (PP) isotático. Este produto possui alto grau de cristalinidade e elevada temperatura de fusão (180°C). Sua fragilidade depende do grau de cristalinidade, da temperatura de transição vítrea e da microestrutura. Outra característica relevante é a ausência de resíduo de catalisador, diferente dos outros

polímeros sintéticos, sendo perfeitamente isotático. Assim como o PP e o polietileno (PE) não contém ramificação, o que facilita a fluidez durante o processamento (GHAFAR, 2002). A estrutura química do PHB é mostrada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura química do PHB.
Fonte: Catoni (2011)

No que diz respeito à utilização do PHB como adesivo na produção de painéis à base de partículas de madeira, até o presente momento não encontrou-se, na literatura disponível, pesquisas semelhantes. Entretanto, apesar da diferença entre as propostas apresentadas, vale a pena destacar a pesquisa realizada por Machado (2008), que avaliou as características dos compósitos de matriz PHB reforçados com pó de madeira. Os resultados mostraram melhora no processamento, na rigidez e na estabilidade, confirmando, deste modo, a boa interação entre o PHB/pó de madeira.

Com raciocínio semelhante, Pereira et al. (2009) também avaliaram as características de compósitos com matriz PHB reforçados com resíduos oriundos da produção de café (casca e pergaminho de café). Os resultados demonstraram, mais uma vez, a boa interação entre o PHB e os resíduos empregados.

3.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS MADEIRAS UTILIZADAS

3.2.1 Madeira de *Tectona grandis* (Teca)

O cultivo comercial da espécie Teca no Brasil começou a ser introduzido no final da década de 1960. Apesar de alguns Estados, como o Paraná, terem experiências em plantio, o grande centro produtor brasileiro é o Mato Grosso (AGROFARTURA, 2010).

No mercado internacional, o uso da Teca ocorre preponderantemente no setor de móveis finos (inclusive para jardim), esquadrias de alta qualidade, pisos, decoração interior e exterior,

tanques para produtos químicos e construção naval, com destaque para o revestimento do convés de veleiros e iates. No Brasil, esta madeira possui alto valor comercial, sendo muito utilizada pela indústria moveleira, setor em que apresenta grande aceitação (REVISTA MADEIRA, 2013).

De acordo com Chagas et. al. (2014), a árvore da espécie Teca é considerada de grande porte e, no Brasil, pode ultrapassar os 3 metros, logo no primeiro ano. As condições de solo e de clima propício para seu desenvolvimento permitem a idade de corte aos 25 anos. Na Figura 5, os aspectos da árvore da espécie Teca juntamente com a textura da madeira são mostrados.

Figura 5 - Árvore de Teca.
Fonte: Reflora Brasil (2016)

Diferente de outros materiais, a madeira varia suas propriedades de espécies para espécie, dentre a mesma espécie e dentro da mesma tora. Além disso, as propriedades são fortemente influenciadas pelas características químicas, físicas e anatômicas da madeira (ROCCO LAHR, 2008).

No que diz respeito às características físico-mecânicas, o Instituto de Pesquisas e Tecnológicas (IPT, 2016) realizou estudos com a Teca, sem especificar a idade, apresentando os seguintes valores para propriedades físicas: densidade aparente de 0,66 g/cm³ (umidade 15%), contração tangencial 4,66% e radial 2,10%. Para propriedades mecânicas, são citados os seguintes valores médios: resistência à compressão axial 47 MPa, módulo de resistência na flexão estática 92 MPa e módulo de elasticidade na flexão estática 9307 MPa.

Em outro estudo com a madeira Teca, Pinto (2007) estudou as madeiras com idades de cinco, dez e trinta anos, provenientes da região Centro-Oeste do Brasil. Os valores para as propriedades físico-mecânicas obtidas para as três idades estudadas foram coerentes com as encontradas pelo IPT (2016).

3.2.2 Madeira de *Pinus* sp.

No Brasil, o gênero *Pinus* está presente há mais de um século, tendo sido inicialmente introduzido para fins ornamentais. Somente a partir de 1950 é que foram plantados em escala comercial para produção de madeira. O seu principal uso é como fonte de matéria-prima para as indústrias de madeira serrada e laminada, painéis, resina, celulose e papel (EMBRAPA, 2012).

Este gênero apresenta cerca de 105 espécies identificadas. De acordo com o IBGE (2016), as plantações de *Pinus* abrangem uma área de 2 milhões de hectares, sendo a segunda maior, ficando atrás apenas das plantações de Eucaliptos. As espécies de *Pinus* mais plantadas são: *P.taeda*, *P.elliottii* (que toleram geadas), *P.caribaea* var. *hondurensis*, *P.oocarpa* e *P.tecunumanii* (que toleram déficit hídrico), e são concentradas nos estados do sul e sudeste (CIFLORESTAS, 2012). Na Figura 6 é mostrado uma plantação de árvores da espécie *Pinus taeda* juntamente com a textura da madeira.

Figura 6 - Plantação de *Pinus taeda* juntamente com a textura da madeira.
Fonte: Agromafra (2016)

No que diz respeito às características físico-mecânicas, Bortoletto Jr. (2008), em seu estudo analisou as propriedades físicas dos *Pinus* encontrados no Brasil. Os valores foram: densidade aparente entre 0,54 e 0,64 g/cm³ (12% de umidade), contrações tangencial entre 5,66 e 7,40% e radial entre 3,50 e 6,34%. Para as propriedades mecânicas são citados: resistência à compressão paralela entre 33 e 44 MPa, módulo de resistência na flexão entre 60 e 104 MPa e módulo de elasticidade na flexão entre 6558 e 14477 MPa.

3.2.3 Resíduos de madeira

A utilização de produtos com insumos provenientes de fontes renováveis é tendência global, neste sentido o uso da madeira é cada vez mais frequente. No entanto, em seu processamento é gerada enorme quantidade de resíduo. Só no Brasil, segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2011), a quantidade de resíduo proveniente do setor florestal ultrapassa 85 milhões m³/ano de resíduo florestal.

Diante dos diversos problemas causados pelo acúmulo desses resíduos, novas regulamentações têm forçado os governos, as empresas e as comunidades a agirem de modo mais efetivo no sentido do eficiente gerenciamento dos mesmos. No Brasil a lei nº 12.305 de 2010, institui a política nacional de gerenciamento de resíduo sólido, estabelecendo diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Frente aos fatos, a produção de painéis de madeira utilizando resíduos provenientes das espécies citadas, além de agregar valor aos resíduos, pode evitar sua destinação à queima para geração de energia (liberando mais carbono para a atmosfera) ou simplesmente descartados de maneira indevida.

3.3 PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA

3.3.1 Generalidades

Diante da crescente demanda por produtos sustentáveis a madeira se destaca pelas excelentes propriedades, no entanto, com a redução da oferta de madeira tropical, em decorrência do aumento das áreas certificadas na Floresta Amazônica, e pelo consequente aumento do emprego de madeira de florestas plantadas, que levam ao aumento da produção dos derivados, a madeira maciça é cada vez mais substituída. Neste sentido, os painéis de madeira reconstituída merecem destaque no que se refere à substituição da escassa e encarecida madeira maciça (ROCCO LAHR, 2008; SOUZA, et al., 2014).

Segundo o Forest Products Statistics (2015), publicado pela Organização das Nações Unidas, a produção mundial de painéis de madeira reconstituída, em 2014, foi de 388 milhões de m³, um aumento de 5,5% em comparação com o ano anterior e um aumento de 34% quando comparado com 2010. Estes valores mostram a importância e a representatividade dos painéis à base de madeira no mercado mundial.

Os painéis à base de madeira, também definidos como compósitos de madeira, surgiram no início dos anos 1940 como forma de viabilizar a utilização de resíduos de madeira, face à dificuldade de obtenção de árvores com diâmetros e qualidades suficientes para a produção de painéis compensados, dado ao isolamento da Alemanha durante a 2^a Guerra Mundial (IWAKIRI, 2005).

Estes produtos são fabricados com madeiras em lâminas ou em diferentes estágios de desagregação. Basicamente, os elementos de madeira, juntamente com o adesivo, passam por algumas etapas num processo de produção que envolve pressão e temperatura (ROCCO, 2008).

De acordo com o Forest Products Laboratory - FPL (2010), os painéis podem ser fabricados a partir de diversas espécies de madeiras, madeira com defeitos, resíduos de madeira, madeira de pequeno diâmetro e resíduos florestais.

A classificação dos painéis à base de madeira é realizada com base na densidade, na matéria-prima e nos métodos de processamento (FPL, 2010). Na Figura 7, que é notória no setor de painéis, é mostrado a classificação dos painéis de madeira conforme mencionado.

Figura 7 - Classificação dos painéis compósitos de madeira por tamanho de partícula, densidade e processo.
Fonte: FPL (2010)

Cada tipo de painel de madeira possui propriedades físico-mecânicas adequadas para determinadas aplicações. Ao analisar a Figura 7, nota-se que a matéria-prima derivada da madeira pode assumir a forma de fibras, partículas e lâminas. Com relação aos painéis a partir de partículas de madeira, pode se dizer que os fatores inerentes à madeira e ao processo de fabricação são controlados para garantir um produto de boa qualidade, capaz de atender as condições de uso durante seu tempo de vida útil.

3.3.2 Fatores que influenciam as propriedades dos painéis de partículas de madeira

Neste item será apresentada a revisão da literatura, de modo geral, dos painéis manufatura a partir de partículas.

3.3.2.1 Espécies de madeira

Com relação à espécie, pode-se destacar a densidade da madeira a ser utilizada como matéria-prima dos painéis. Esta característica é fundamental, pois a densidade é importante fator na seleção das espécies que podem ser empregadas na mencionada manufatura. Em termos gerais, as madeiras de densidade mais reduzida possibilitam a produção de painéis em faixa de densidade que proporciona aplicações mais variadas (MANOLEY, 1993).

Entretanto, Nascimento et al. (2011) fabricaram painéis com matéria-prima proveniente de espécies de madeira com alta densidade, provenientes da caatinga do Nordeste do Brasil. Os resultados foram superiores aos requisitos normativos então vigentes.

3.3.2.2 Teor de umidade das partículas

Segundo Maloney (1977), o teor de umidade e a sua distribuição no colchão de partículas contribuem significativamente para as propriedades finais dos painéis. Dependendo

do tipo de resina, da espessura das partículas e da espécie de madeira empregada a quantidade de umidade pode variar, o que influencia, sobretudo, o tempo de prensagem dos painéis.

De acordo com MATOS (1988), aumentar o teor de umidade pode diminuir o tempo para se atingir uma espessura desejada. Isso porque a umidade e a temperatura em conjunto proporcionam uma maior plasticização da madeira que oferecerá menor resistência à compactação. O aumento do teor de umidade também pode acelerar o deslocamento de vapor das camadas externas para as internas, facilitando o aquecimento e a cura da resina. Todavia, elevados teores de umidade requerem tempos mais longos de prensagem até que a quantidade suficiente de vapor seja liberada, permitindo a adesão entre partículas de camadas interiores.

3.3.2.3 Geometria, orientação e composição das partículas

O processo de gerar as partículas de madeira consiste em transformar a madeira roliça ou o resíduo de serraria em pequenas partes. A diferença entre os diversos tipos de painéis está no formato e orientação das partículas. Nos painéis OSB, por exemplo, a geometria, a orientação paralela às fibras e a composição das partículas são variáveis importantes na manufatura, pois estão estreitamente relacionadas às propriedades mecânicas deste tipo painel (CLOUTIER, 1998). Já nos painéis aglomerados, devido à pequena dimensão das partículas, a orientação em relação às fibras não acontece. Porém, os aglomerados podem ser confeccionados tendo partículas mais finas nas camadas externas (o que garante melhor acabamento superficial), ou partículas distribuídas aleatoriamente, assumindo uma configuração homogênea (NASCIMENTO, 2003; DIAS, et al. 2008; BERTOLINI, 2011).

3.3.2.4 Tipo de adesivo

Os adesivos são substâncias naturais ou sintéticas capazes de aglutinar as partículas de madeira. Os naturais geralmente são de proteínas de origem animal (albumina, glutina e caseína) ou vegetal (soja, batata, trigo e látex), já os adesivos sintéticos são polímeros que se assemelham aos adesivos naturais nas características físicas, podendo ser adaptados para atender requisitos específicos (ECKELMAN, 1997).

A escolha de um determinado tipo de adesivo na produção de painéis de partículas de madeira está condicionada ao uso do produto e aos custos. Sendo o componente de maior custo, torna-se muito importante à definição do tipo e quantidade de adesivo a ser utilizado, no sentido de se buscar uma otimização na relação custo-benefício (MENDES et al., 2010).

Segundo Campos e Rocco Lahr (2005), os principais adesivos empregados na fabricação de painéis à base de partículas de madeira são os sintéticos, destacando-se o fenol-formaldeído, o resorcinol-formaldeído, a ureia-formaldeído e a melamina-formaldeído. Estes quatro somam, aproximadamente, 90% de todos os adesivos utilizados em painéis de madeira, todos derivados de combustíveis fósseis.

3.3.2.5 Tempo, temperatura e pressão específica de prensagem

O tempo e a temperatura de prensagem são parâmetros correlatos, controlados para assegurar que a temperatura do centro do painel atinja o nível requerido para cura da resina. O tempo de prensagem também deve ser suficiente para permitir a migração do vapor d'água para as bordas da painel e sua liberação até o final da prensagem (IWAKIRI, 1989).

A principal função da temperatura da prensa na produção de painéis de partículas consiste em reduzir a resistência à compressão e facilitar a densificação do painel, todavia, também pode acelerar o processo de cura do adesivo (MATOS, 1988). Iwakiri (1989) encontrou evidências de que quanto maior a temperatura de prensagem maior será o fluxo de calor, permitindo melhor densificação das camadas mais internas dos painéis, resultando em maior resistência das ligações internas e incremento da resistência na flexão estática. Entretanto, por questões de custo, atualmente busca-se a menores temperatura que possibilite a cura satisfatória do adesivo.

Segundo Calegari et al. (2005), a pressão de prensagem além de determinar a espessura e a densidade final, ainda ajuda na transferência do calor responsável pela cura do adesivo, proporcionando a consolidação do painel. De acordo com García et al. (2001), o calor plasticiza a madeira e polimeriza o adesivo, enquanto a pressão exercida pelos pratos da prensa junta as partículas, aderindo-as.

3.3.2.6 Densidade do painel

A densidade do painel é um parâmetro de grande importância para adequação das propriedades dos painéis de partículas de madeira. De acordo com Kelly (1977), a densidade média final de um painel de partículas depende da densidade da matéria-prima e a pressão de compactação da prensa. Qualquer alteração em um destes fatores requer um ajuste no outro, isso se a densidade média do painel permanecer constante.

Na pesquisa realizada por Albuquerque (2002), para painéis aglomerados com densidades de 0,5, 0,7 e 0,9 g/cm³, foram constatados aumentos nos valores de ligação interna, flexão estática e inchamento em espessura, para painéis com maiores densidades. Por outro lado, os valores de absorção de água diminuíram com o aumento na densidade dos painéis.

Segundo Moslemi (1974) e Maloney (1993), a relação entre a densidade do painel e a densidade da madeira utilizada, denominada de razão de compactação, exerce acentuada influência nas propriedades dos painéis particulados de madeira. Valores entre 1,3 a 1,6 garantem um contato adequado entre as partículas de madeira para que ocorra ligação adesiva entre elas.

3.3.3 Painéis aglomerados

Neste item será apresentada a revisão da literatura a respeito dos painéis aglomerados.

3.3.3.1 Generalidades sobre os painéis aglomerados

Os painéis aglomerados são constituídos por partículas de madeira com pequenas dimensões unidas por um adesivo após um processo que envolve pressão e temperatura. A geometria das partículas, os níveis de resina, a densidade e os processos de fabricação podem ser modificados visando atender aos requisitos de aplicações específicas. Durante sua confecção, aditivos também podem ser incorporados para conferir melhorias de desempenho, como maior estabilidade dimensional, retardo na propagação das chamas e resistência à umidade (CPA, 2012).

Durante o processo de produção as partículas podem ser separadas por tamanho, o que facilita a formação de camadas. As configurações básicas dos painéis aglomerados são: *homogêneas*, em que a mistura das partículas é feita ao acaso; *múltiplas camadas*, neste caso usam-se partículas mais finas nas camadas externas e mais grossas na camada central, e por último, camadas graduada, onde as partículas mais grossas também ficam no centro do painel, resultando numa superfície mais lisa para laminação, sobreposição, pintura ou revestimento (Figura 8) (FPL, 2010). Geralmente, adota-se proporção entre 15 a 25% de partículas finas nas faces (MALONEY, 1977; DIAS et al. 2005). Na Figura 9 alguns painéis aglomerados industriais de múltiplas camadas e diferentes espessuras são mostrados.

Figura 8 - Composição estrutural dos painéis de madeira aglomerada.
Fonte: Iwakiri (2003)

Figura 9 - Painéis de partículas de madeira aglomeradas.
Fonte: Delanno (2015)

A densidade das partículas é uma das variáveis mais importantes a influir na qualidade dos painéis MDP, em geral, utiliza-se madeira de baixa e média densidade (ROCCO LAHR, 2008). Vale ressaltar que as madeiras de Teca e de *Pinus* sp. são consideradas de baixa e média densidade (IPT, 2016, 1989).

3.3.3.2 Produção industrial dos painéis aglomerados

O processo de produção de painéis aglomerados envolve, basicamente, as seguintes etapas: 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 (IWAKIRI, 2005). Na Figura 10 o fluxograma do processo de fabricação de painéis de madeira aglomerada é mostrado.

Figura 10 - Fluxograma do processo de fabricação de painéis de madeira aglomerada.

Fonte: FPL (2010)

Uma vantagem deste tipo de painel é a facilidade de produção a partir de, praticamente, qualquer material à base de madeira, como: serragem, aparas de plaina e, em menor grau, resíduos de fábricas e outros materiais residuais. No entanto, para fabricação de aglomerados com boa resistência, superfície lisa e inchamento igual, os fabricantes dão preferência à matéria-prima mais homogeneia (FPL, 2010).

3.3.3.3 Adesivos empregados na produção dos painéis aglomerados

Depois da madeira, o principal constituinte dos painéis é o adesivo. Apesar da existência de vasta quantidade, como a melamínica, fenólica entre outras, atualmente a resina ureia-formaldeído tem sido a mais utilizada pelas indústrias de painéis

aglomerados, por apresentar várias vantagens, como custo competitivo, “cura” rápida, baixa influência na coloração, alto teor de sólidos e tempo de cura. Com relação às desvantagens, as principais são: a emissão de formol e a baixa resistência à água (KATSUKAKE, 2009; IWAKIRI et al., 2005; ROCCO LAHR, 2008).

Apesar de não estar difundida no setor industrial, a resina à base de óleo de mamona, vem mostrando excelentes resultados quando usadas na confecção de painéis de partículas de madeira (LIMA et al., 2008; LAPO; BERALDO, 2008; FIORELLI et al., 2013; SOUZA et al., 2014; BATTISTELLE, et al., 2016).

3.3.3.4 Aplicações dos painéis aglomerados

Dentre os produtos à base de madeira, os painéis aglomerados vêm apresentando uma das maiores taxas de crescimento na produção e na demanda, isso devido à qualidade e a facilidade de uso deste produto em diversas aplicações. Atualmente, é o painel de partículas de madeira reconstituída mais produzido e consumido no mundo. Na Europa e nos Estados Unidos da América do Norte (EUA) sua produção foi de 35,5 e 9,9 milhões de m³ em 2013, respectivamente (FOREST PRODUCTS, 2014).

Segundo a ABIPA (2010), as aplicações dos painéis aglomerados, principalmente os de média densidade, têm sido em grande parte na indústria moveleira (Figura 11). Todavia, o segmento da construção civil (pisos, divisórias, forros e embalagens) também merece destaque (NASCIMENTO, 2003; HILL, et al., 2015).

Figura 11 - Exemplo de aplicação dos painéis aglomerados de média densidade na indústria moveleira.
Fonte: Cetron (2016)

Os aglomerados apresentam uma série de vantagens em relação à madeira serrada: (i) minimização dos efeitos da anisotropia; (ii) maior uniformidade de propriedades físico-mecânicas em diferentes pontos do painel; (iii) eliminação de defeitos naturais como nós e tensões de crescimento; (iv) possibilidade de controle das propriedades físico-mecânicas do painel através das variáveis do processo produtivo e (v) menor exigência em termos de qualidade da madeira, possibilitando uso de resíduos provenientes de outras fontes de processamento (IWAKIRI, 2005).

3.3.4 Painéis OSB

Neste item será apresentada a revisão da literatura a respeito dos painéis de partículas orientadas OSB.

3.3.4.1 Generalidades sobre os painéis OSB

Os painéis de partículas orientadas (OSB) foram desenvolvidos nos anos de 1970 nos EUA. Com o aumento da demanda, a partir dos anos de 1996 e 1997 surgiram indústrias de painéis OSB na Europa, Ásia e Chile. No Brasil, a primeira e única fábrica foi construída em 2001, a produção nacional iniciou-se em janeiro de 2002, com capacidade produtiva de 350 mil metros cúbicos anuais (IWAKIRI, 2005; REVISTA MADEIRA, 2003).

De acordo com a norma europeia EN 300 (2006), o OSB (da expressão inglesa Oriented Strand Board) é definido como um painel de camadas múltiplas, feitas a partir de tiras de madeira com forma predeterminada, normalmente com o comprimento maior que 50 mm e espessura menor que 2 mm, unidas por adesivo. As tiras de madeira, também conhecidas como strands, tendem a se alinhar paralelamente ao comprimento do painel nas camadas externas. Na camada do centro os strands podem ser distribuídos aleatoriamente ou alinhados, geralmente em direção perpendicular às das camadas externas. A orientação dos strands em cada camada no painel OSB é mostrada na Figura 12.

Figura 12 - Orientação das camadas do painel OSB.
Fonte: EPF (2011a)

Segundo a Structural Board Association - SBA (2011), os painéis OSB são, geralmente, compostos por três camadas e o alinhamento longitudinal dos strands das camadas externas aumenta a resistência e a rigidez do painel nesta direção. De acordo com FPL (2010), o controle das dimensões dos strands, a orientação e a construção em camadas permitem ao OSB ser concebido para satisfazer diferentes aplicações, em especial as estruturais. Em relação à composição das camadas (face/miolo/face), Cloutier (1998) e Mendes (2010) afirmam que a proporção ideal de partículas entre elas é na faixa de 20:60:20 a 30:40:30.

A densidade dos painéis OSB, conforme já mencionado, é parâmetro de grande importância para adequação das propriedades dos painéis de madeira. De acordo com Zhou, (1989;1990), a faixa ideal de densidade para manufatura do OSB está entre 0,65 e 0,70g/cm³. No entanto, Mendes et al. (2008) e Nascimento et al. (2011) aumentaram a densidade nominal do painel de 0,70 para 0,90 g/cm³ e isso resultou em maiores valores de MOE, MOR e ligação interna, promovidos pelo aumento do material lenhoso e pela razão de compactação.

3.3.4.2 Produção industrial dos painéis OSB

Segundo a empresa LP Brasil (2011a), o processo industrial de produção dos painéis OSB apresenta as seguintes etapas:

- As toras são descascadas e cortadas em tiras ao longo de suas fibras;
- Estas tiras são secas, classificadas por granulometria e misturadas com uma composição de resinas à prova d'água, emulsão parafínica e anti-cupim;
- Esta composição segue para as formadoras onde são produzidas as camadas orientadas, formando o colchão;

- O colchão entra na prensa contínua de alta temperatura e pressão;
- Na saída os painéis são cortados em suas dimensões comerciais.

Embora os painéis OSB venham sendo utilizadas há várias décadas, somente a partir dos anos 1990 o setor industrial passou a competir em larga escala com as indústrias produtoras de painéis de madeira compensada (EINSFELT et al., 1998). As etapas da produção industrial dos painéis OSB descritas anteriormente são mostradas na Figura 13.

Figura 13 - Processo industrial de produção de OSB.
Fonte: Mendes (2001)

Segundo a EN 300 (2006), os painéis OSB são classificados em quatro categorias de acordo com o modo de aplicação, sempre levando em consideração, principalmente, o tipo de carregamento e a exposição à umidade.

3.3.4.3 Adesivos empregados na produção dos painéis OSB

O tipo de adesivo empregado é responsável por garantir a união entre as partículas, deste modo, exerce grande influencia nas propriedades finais dos painéis. Nas indústrias produtoras de painel OSB, os principais adesivos utilizados são: fenol-formaldeído (FF), isocianatos (PMDI) e melamina-ureia-formaldeído (MUF). Todas estas resinas conferem uma medida de

resistência à umidade do composto (WPIF, 2011). Iwakiri (2005) cita algumas características das resinas mais usuais na produção de OSB:

- Ureia-formaldeído (UF): desenvolvida nos anos 1930, apresenta baixo custo em relação a outras resinas. Porém, é susceptível à degradação hidrolítica na presença de umidade e/ou ácidos, especialmente em temperaturas moderadas e elevadas;

- Melamina-Formaldeído (MF): classificada como de uso intermediário entre ureia formaldeído e fenol-formaldeído, apresenta maior resistência à umidade em relação à UF. Desta forma, a resina MF pode ser utilizada como “fortificante”, em mistura com a UF, na proporção de até 40:60 (M/U). Tais misturas estão disponíveis no mercado com a denominação de melamina-ureia-formaldeído (MUF);

- Isocianatos: empregados pela primeira vez nos anos 1940, estas resinas não emitem formaldeído livre, entretanto, podem aderir às superfícies metálicas durante a prensagem;

- Fenol-formaldeído (FF): introduzido comercialmente nos anos 1930, apresenta como característica principal a alta resistência à umidade, sendo classificado como de uso exterior.

Conforme se observa, dentre os quatro adesivos mais utilizados, três são emissores de formaldeído, substância tóxica que provoca diversos males ao meio ambiente e ao ser humano, como já mencionado em itens anteriores.

3.3.4.4 Aplicações dos painéis OSB

O OSB é um painel adaptável, seu leque de aplicações cresce à medida que mais indústrias se convencem do seu potencial. A utilização deste painel é muito difundida, principalmente, na América do norte e no continente europeu. As aplicações mais usuais são: pavimentos, estruturas de paredes, forros de telhado, estruturas de madeira de edifícios, construção de stands, embalagens; estruturas interiores de veículos, divisórias interiores de anexos, mobiliário decorativo, vigas e traves, formas de concreto etc (LP BRASIL, 2011b). Algumas destas aplicações são mostradas na Figura 14.

Figura 14 - Exemplos de utilização do OSB. a) Tapumes, b) Pisos, c) e d) estruturas de sofá.
Fonte: LPbrasil (2011b)

Em geral, a indústria da construção civil já está familiarizada com este produto material, sua designação e aspecto inconfundível. No entanto, estudos de mercado revelam que subsiste ainda um desconhecimento significativo das potencialidades do OSB, não sendo, por isso, devidamente aproveitado como um dos produtos de construção dos mais versáteis e econômicos dos tempos contemporâneos (EPF, 2011b).

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diante do escopo apresentado, pode-se afirmar que os problemas que foram tratados nesse projeto referiram-se à emissão de formaldeído (proveniente dos adesivos convencionais utilizados nas indústrias de painéis), a utilização de produtos sustentáveis e ao gerenciamento eficaz de resíduos lignocelulósicos.

O estado da arte apresentou que atualmente os agentes ligantes mais utilizados pelas indústrias de painéis são produzidos a partir do formol. No entanto, a notável tendência em utilização de produtos biodegradáveis e renováveis juntamente com as legislações cada vez mais rígida, o uso desse tipo de adesivo está cada vez mais restrito. Consequentemente, a busca por agentes ligantes alternativos é cada vez mais frequentes, neste sentido, o presente trabalho buscou contribuir para o aumento do conhecimento científico sobre a utilização do polímero natural polihidroxibutirato (PHB) e do resíduo de tinta à base de resina epóxi como

agente ligante na produção de painéis aglomerados e painéis OSB, visando reduzir a utilização dos adesivos tradicionais (ureia-formaldeído).

Outro ponto importante é o aproveitamento dos rejeitos/resíduos de serraria das madeiras de *Pinus* sp. e Teca, pois estas espécies possuem grande potencial para o setor moveleiro, que gera uma grande de resíduos.

Cabe ressaltar que ausência de estudos semelhantes, nos principais bancos de dados disponíveis, como Science Direct, Web of Science, Web of Knowledge, entre outros, mostraram as lacunas de informações correlacionadas com o tema, o que destaca a originalidade e a relevância do presente estudo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão expostos os materiais e os métodos empregados para a produção dos painéis de partículas de madeira aglomerada e dos painéis de partículas orientadas (OSB), bem como mencionados os equipamentos e os ensaios realizados na respectiva caracterização físico-mecânica.

4.1 MATERIAIS

As partículas de madeira que constituíram os painéis aglomerados foram obtidas após processamento dos resíduos gerados na etapa de desengrosso das peças de *Pinus* sp. e *Tectona grandis* (Teca). As tiras de madeira (strands) para os painéis OSB foram obtidas processando os rejeitos como pontas de vigas e costaneiras.

Como adesivos foram utilizados o polímero natural polihidroxibutirato (PHB) e o resíduo de tinta à base de resina epóxi, ambos fornecidos pela empresa Plural Indústria Química LTDA. Cabe ressaltar que esses materiais estavam no estado sólido na forma de um pó muito fino. A resina ureia-formaldeído (pH de 7,8; teor sólido de 65%; densidade de 1,27 g/cm³) fornecida pela empresa SI Group, Inc também foi utilizada como agente ligante.

Os equipamentos utilizados foram: serra circular; gerador de partículas; picador; moinho; estufa; balança analítica; encoladeira; separador de partículas; misturador; prensa hidráulica a quente (força máxima 80 toneladas e temperatura máxima 200°C); paquímetro digital, máquina universal de ensaios com 25 kN de capacidade.

4.2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido no Campus I da USP de São Carlos, especificamente no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), pertencente ao Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP).

4.2.1 Produção dos painéis aglomerados

A produção dos painéis em laboratório foi dividida em três etapas: obtenção e caracterização das partículas, estudo preliminar e estudo principal.

4.2.1.1 Obtenção e caracterização das partículas

4.2.1.1.1 Geração das partículas

Os resíduos provenientes do processo de desengrosso da madeira de *Pinus* sp. e *Tectona grandis* foram processados em moinho-martelo do tipo Willye da Marconi (Modelo MA 680). Para confecção dos painéis, adotaram-se partículas passantes da peneira de 2,8 mm de abertura, embasando-se nos estudos realizados por Nascimento (2003), Dias (2008), Bertolini (2011;2014) e Varanda (2012; 2016), nos quais se obtiveram excelentes desempenhos dos painéis produzidos. Na Figura 15 é mostrado o processamento dos resíduos de Teca para obtenção das partículas. Esta etapa foi comum às duas fases do trabalho citadas (preliminar e principal).

Figura 15 - Processo de obtenção das partículas de Teca
Fonte: Autoria própria

4.2.1.1.2 Propriedades físicas das partículas

- Análise granulométrica

Este ensaio se constituiu de uma adaptação do ensaio de ABNT NBR NM 248:2003, intitulado: “Agregados - Determinação da composição granulométrica”.

Para a classificação das partículas adotou-se o equipamento de granulometria SOLOTEST, utilizando-se peneiras cujas aberturas atendem à especificação da ASTM, sendo estas correspondentes a 7, 10, 16, 30, 40 e 50 mesh (2,83; 2,0; 1,19; 0,59; 0,42 e 0,29 mm, respectivamente). A partir do material processado (Figura 16), retirou-se uma amostra de 200 gramas, sendo esta vibrada por 10 minutos, à velocidade de vibração 5, atravessando as peneiras em ordem decrescente de abertura. Foram realizadas 3 repetições e as partículas passantes na peneira de 50 mesh foram determinadas como finos.

Figura 16 - Partículas de madeira *Pinus* sp e Teca, respectivamente.
Fonte: Autoria própria

Vale destacar que as partículas processadas foram utilizadas em sua totalidade, ou seja, com a aplicação dos finos, pois estes, de acordo com Bertolini (2011), Poletto (2014) e Varanda (2016), quando aplicados em quantidade inferior a 12% auxiliam na adesão das partículas pelo adesivo, consequentemente, melhorando as propriedades dos painéis.

4.2.1.2 Estudos preliminares

Para a produção dos painéis aglomerados, dada a singularidade dos insumos utilizados, primeiramente foi necessário estabelecer os parâmetros a partir de uma série de testes preliminares. Nas etapas preliminares buscou-se estudar as condições de processamento e composição dos painéis, de forma a definir os fatores e a metodologia para cada tipo de adesivo em questão.

Para a produção dos painéis tendo o resíduo epóxi como adesivo, conforme mostra a Tabela 1, os parâmetros massa de partículas, teor de resíduo epóxi, temperatura e pressão foram mantidos constantes e variaram-se o tempo de prensagem em 5, 10 e 15 minutos, respectivamente, etapa 1, 2 e 3.

Tabela 1 - Delineamento experimental da produção dos painéis com resíduo epóxi					
Etapa	Massa partículas(g)	Teor de resíduo epóxi*	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Pressão (MPa)
1	582	10%	180	5	4
	582	10%	190	5	4
	533	20%	180	5	4
	533	20%	190	5	4
2	582	10%	180	10	4
	582	10%	190	10	4
	533	20%	180	10	4
	533	20%	190	10	4
3	582	10%	180	15	4
	582	10%	190	15	4
	533	20%	180	15	4
	533	20%	190	15	4

* Com base na massa seca das partículas

Fonte: Autoria própria

A respeito dos parâmetros apresentados na Tabela 1, cabe destacar que a pressão de 4 MPa adotada foi embasada nos excelentes resultados alcançados por Nascimento (2003), Dias (2008), Bertolini (2011) e Varanda (2016). A respeito da temperatura de prensagem, de acordo com Weg (2008), os agentes de cura das tintas à base de resina epóxi reagem à temperatura entre 140 e 200°C. Deste modo, optou-se por uma temperatura máxima de

prensagem de 190°C, levando em consideração a degradação térmica da madeira, a variação de temperatura e a própria capacidade da prensa utilizada. Sobre o teor de resíduo de tinta, nos testes preliminares procurou-se estabelecer uma porcentagem mínima capaz de atender aos requisitos do documento normativo brasileiro (ABNT NBR 14810:2, 2013). Assim, arbitrariamente iniciou-se com 10 e 20%. Por último, para o tempo de prensagem, buscou-se determinar o mínimo necessário para completar a fusão do resíduo de tinta epóxi nas temperaturas adotadas.

Para a produção dos painéis tendo o PHB como adesivo, assim como na produção com resíduo epóxi, também se estudaram os parâmetros de produção, conforme mostrado na Tabela 2. Nota-se que os parâmetros: massa de partículas, teor de PHB, temperatura e pressão de prensagem também foram comuns entres as três etapas, já o tempo variou em cada etapa.

Tabela 2 - Delineamento experimental da produção dos painéis com PHB

Etapa	Massa partículas (g)	Teor de adesivo*	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Pressão (MPa)
1	582	10%	140	5	4
	582	10%	160	5	4
	533	20%	140	5	4
	533	20%	160	5	4
2	582	10%	140	10	4
	582	10%	160	10	4
	533	20%	140	10	4
	533	20%	160	10	4
3	582	10%	140	15	4
	582	10%	160	15	4
	533	20%	140	15	4
	533	20%	160	15	4

* Com base na massa seca das partículas.

Fonte: Autoria própria

Conforme mostrado na Tabela 2, os parâmetros adotados na fase preliminar para a produção dos painéis com PHB, com exceção da temperatura de prensagem, foram os mesmos utilizados na produção dos painéis com resíduo epóxi (Tabela 1). As temperaturas foram estabelecidas após observar que, assim como mostrado por Machado (2010) e Catoni (2011), a fusão (T_m) do PHB ocorre a 175°C. Entretanto, devido à baixa estabilidade térmica deste polímero, acima de 170°C ocorre diminuição na massa molecular. Logo, para garantir sua

integridade, a temperatura máxima de prensagem dos painéis com PHB foi de 160°C. Já para temperaturas inferiores a 140°C, os painéis não apresentavam resistência mecânica, pois não houve energia suficiente para fundir o adesivo.

Para a produção na etapa preliminar, independente do tipo de adesivo, buscou-se uma configuração intermediária em relação ao proposto nos objetivos no presente trabalho. Deste modo, os painéis foram confeccionados com densidade média e configuração homogênea, contendo 100% de partículas de *Pinus* sp.

Para realização dos testes preliminares, foram produzidos 3 painéis para cada condição descrita nas Tabelas 1 e 2, ou seja, 108 painéis para cada tipo de adesivo utilizado (PHB e resíduo epóxi). Em cada painel retiraram-se: 3 corpos-de-prova (CPs) para a determinação do Módulo de Elasticidade (MOE) e do Módulo de Resistência (MOR), na flexão estática; 3 CPs para determinação da Resistência à Tração Perpendicular (TP); e 1 CP para Resistência ao Arrancamento de Parafusos, face e topo (RAPf e RAPt, respectivamente). Todos os testes seguiram as recomendações do documento normativo NBR 14810:3 (2013).

4.2.1.3 Considerações sobre o estudo preliminar

A respeito do resíduo epóxi, observou-se que os resultados foram, no geral, inferiores aos requisitos mínimos do documento normativo NBR 14810:2 (2013). Deste modo, visando atender tais requisitos, a partir dos parâmetros de produção que apresentaram melhores resultados, os painéis definitivos foram fabricados com adição 5% de resina ureia-formaldeído (teor sólido de 65%) com base na massa seca das partículas.

Sobre os painéis com o PHB como adesivo, observou-se que durante o processo de produção houve necessidade de desgaseificação por meio de ciclos de prensagem. Entretanto, ainda assim, a pressão gerada pelos gases no interior dos painéis causaram explosões ao término do processo de prensagem, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Explosões provocadas pelos gases contidos no interior dos painéis com PHB.

Fonte: Autoria própria

Após uma produção trabalhosa, devido às diversas perdas causadas pelas explosões, decidiu-se encerrar o estudo com o PHB já na etapa preliminar, pois foi constatado que seria inviável dar continuidade frente à dificuldade apresentada ao se trabalhar com este polímero nas condições mencionadas.

4.2.1.4 Confeção dos painéis principais

Na produção dos painéis do estudo principal, inicialmente as massas das partículas de madeira e dos adesivos foram aferidas nas quantidades específicas. Em seguida iniciou-se o processo de mistura das partículas com a resina ureia-formaldeído (5%) e com o resíduo de tinta epóxi (Figura 18). O colchão de partículas com configuração homogênea foi formado utilizando-se uma caixa de madeira com dimensões nominais 30 cm de largura por 30 cm de comprimento, colocada sobre um molde de aço com 12 mm de espessura nominal.

Figura 18 - Resíduo de tinta em pó e a resina ureia-formaldeído (a) Misturados entres os adesivos as partículas de madeira (b).

Fonte: Autoria própria

A formação do colchão foi realizada em prensa mecânica manual, fabricação própria, à pressão de 0,01 MPa. Em seguida, houve a prensagem utilizando uma prensa semi-automática,

Marconi Modelo MA 098/50, por 10 minutos numa temperatura de 190°C, a 4,0 MPa. Na Figura 19, as etapas de produção dos painéis são mostradas, resumidamente. Inicia-se pela aferição das massas das partículas e adesivo, mistura dos mesmos, pré-prensagem e prensagem a quente.

Figura 19 - a) Aferição de massa do adesivo, b) e c) Homogeneização do adesivo e das partículas, d) Pré-prensagem e e) Prensagem a quente.

Fonte: Autoria própria

Para estabilização e cura completa, os painéis foram acondicionadas por 72 horas e esquadrejadas após este período, em serra circular, nas dimensões 25 x 25 cm para posterior retirada dos corpos-de-prova, para os ensaios de caracterização. Os painéis (com PHB e resíduo epóxi como adesivos) produzidos na etapa preliminar são mostrados na Figura 20.

Figura 20 - Parte dos painéis confeccionados na fase preliminar.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 21 é mostrado parte da sequência seguida na produção dos painéis da etapa principal, percebe-se que os painéis foram produzidos com baixa, média e alta densidade

(0,60; 0,70 e 0,80g/cm³, respectivamente). Para cada densidade variou-se o teor de resíduos de tinta epóxi em três níveis, iniciando a partir dos melhores resultados nos testes preliminares (20, 30 e 40%). Para cada teor de resíduo de tinta houve cinco proporções de adição de partículas de Teca (0, 25, 50, 75 e 100%). Para facilitar o entendimento, apenas a sequência de produção dos painéis de alta densidade, com 40% de resíduo de tinta, foi mostrada. No entanto, a mesma lógica se aplica aos demais teores de resíduo e as demais densidades.

Figura 21 - Organograma de produção que mostra a sequência de produção.
Fonte: Autoria própria

A sequência mostrada na Figura 21 evidencia que se trabalhou com 15 condições de produção para cada densidade, sendo três níveis de densidade, totalizou 45 condições (tratamentos) para o presente estudo.

4.2.1.5 Caracterização dos painéis principais

A seguir, são listados os ensaios realizados para a caracterização dos painéis:

- Caracterização das partículas: Teor de umidade; Análise granulométrica;
- Caracterização dos aglomerados produzidos, quanto às propriedades físicas: Teor de umidade (TU) Densidade (ρ); Inchamento em espessura (IE); Absorção de Água (Ab) e quanto às mecânicas: Flexão Estática (MOE e MOR); Resistência à Tração Perpendicular (TP); Resistência ao Arrancamento de Parafusos - face (RAPf); Resistência ao Arrancamento de Parafusos - topo (RAPt);

- Demais análises: Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Os ensaios para determinação das propriedades dos painéis foram realizados de acordo com a norma brasileira NBR 14810:2 (ABNT, 2013). Também foi utilizada a norma americana ANSI A208.1 (2009) para efeito de comparação.

4.2.1.5.1 Obtenção dos corpos-de-prova

Na Tabela 3 é mostrado todos os ensaios realizados e as quantidades de corpos-de-prova retirados em cada painel e na Figura 22 é mostrado a distribuição dos CPs e suas dimensões. Os espécimes para os ensaios TU, ρ , IE, Ab e TP foram retirados, respectivamente, dos corpos-de-prova já ensaiados de Flexão estática e os corpos-de-prova de RAPt foram retirados dos CPs de RAPf ensaiados. Vale ressaltar que estes procedimentos já foram utilizados por outros pesquisadores (DIAS, 2005; 2008; NASCIMENTO, 1998; 2003; BERTOLINI, 2011; 2014, VARANDA, 2012; 2016).

Tabela 3 - Ensaios realizados e a quantidade de corpos de prova retirada em cada painel.

Ensaios	Nº de Cps
Teor de Umidade (TU)	-
Densidade (ρ)	3
Inchamento em espessura 2 e 24 horas (IE)	3
Absorção de Água 2 e 24 horas (Ab)	3
Flexão estática (MOR e MOE)	3
Tração Perpendicular (TP)	4
Arrancamento de Parafusos face (RAP _f)	2
Arrancamento de Parafusos topo (RAP _t)	2
Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)*	-
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*	-

*Devido ao alto custo essas análises não abrangeram todos os painéis produzidos.

Fonte: Autoria própria

Figura 22 - Distribuição e dimensões dos corpos-de-prova retirados em cada painel.

Fonte: Autoria própria

As amostras para as análises de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram retiradas dos painéis de média densidade produzidos com 30% de teor de resíduo de tinta, sendo uma amostra para cada adição de Teca, totalizando cinco amostras para cada análise.

4.2.1.5.2 Propriedades físicas dos painéis

- Teor de umidade

As amostras com dimensões nominais 50 x 50 mm foram inicialmente pesadas em balança analítica (modelo Ohaus, modelo ARD 110) com precisão 0,01g para obtenção da massa úmida. Em seguida, os corpos de prova foram levados à estufa Marconi (modelo MA 035) com circulação de ar, a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, onde permaneceram até atingirem massa constante.

- Densidade

Os valores de densidade de amostras de 50 x 50 mm foram alcançados por meio da relação massa/volume, com auxílio de paquímetro digital Mitutoyo (0,01 mm) e pesagem em balança analítica (0,01g) dos corpos-de-prova.

- Inchamento em Espessura e Absorção de Água

Para a obtenção destas propriedades, amostras com dimensões de 25 x 25 mm foram medidas em relação à espessura e pesadas, com auxílio de paquímetro digital Mitutoyo (0,01 mm) e balança analítica (0,01g), antes e após imersão em água a 20°C, por períodos de 2 e 24 horas.

4.2.1.5.3 Propriedades mecânicas dos painéis

Os ensaios para caracterização mecânica dos painéis: Flexão estática para obtenção do MOR e MOE; TP; RAPf e RAPt foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio AMSLER, capacidade de 250 KN. Nas Figuras 23, 24 e 25 são apresentados os ensaios citados neste item.

Figura 23 - Ensaio de flexão estática.
Fonte: Autoria própria

Figura 24 - Ensaio de resistência ao arrancamento de parafusos face e topo.
Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Ensaio de tração perpendicular às faces.
Fonte: Autoria própria

4.2.1.5.4 Demais Análises

Nesta subseção, as metodologias para realização das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) serão apresentadas. Devido o alto custo esses procedimentos foram realizados apenas nos painéis com densidade média tendo 30% de resíduo de tinta.

- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As fotomicrográficas de MEV foram obtidas no Departamento de Engenharia de Materiais (SMM/EESC,USP), empregando-se o equipamento FEI (modelo Inspect F50) com detector EDS Apollo X SDD, operando com feixe de elétrons de 20kV (Figura 26).

Por meio da microscopia eletrônica de varredura analisou-se a morfologia das superfícies de fratura dos corpos-de-prova. As imagens, neste procedimento, são obtidas por diferentes sinais produzidos pela interação de elétrons com a amostra (CANEVAROLO JR., 2004). As amostras preparadas com dimensões de 1,5 x 1,5 cm foram secas em estufa com circulação de ar, marca Marconi modelo MA 035, a 50°C, por 24 horas, anteriormente ao ensaio e mantidas em dessecador até o momento do mesmo.

Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura.
Fonte: Autoria própria

- Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram executados nas dependências do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC/USP). Este ensaio determina a porosidade dos materiais, pois fornece a densidade aparente, distribuição do número de poros, volume total de poros e área específica do material.

As amostras foram seccionadas com dimensões nominais de 12 mm de espessura (espessura nominal do painel), 14 mm de largura e 23 mm de comprimento, em seguida foram secas em estufa com circulação de ar, a 50°C, por 24 horas até o início do ensaio, procedimento realizados para evitar influências causadas pela umidade.

As análises foram conduzidas no equipamento Micromeritics Poresizer 9320, com capacidade de pressão de 200 MPa (Figura 27). Os parâmetros do processo foram: mercúrio com tensão superficial de 0,485 g/cm²; densidade entre 13.5325 e 13.5379 kg/m³; ângulo de contato do avanço e retrocesso de 130°; e tempo de equilíbrio entre a baixa e alta pressão de 10 s.

Figura 27 - Corpo de prova (a), cápsula para intrusão do mercúrio (b) e equipamento Micromeritics Poresizer - 9320 (c).

Fonte: Adaptado de Bertolini (2011)

4.2.1.6 Análise Estatística

A metodologia estatística foi empregada; (i) para avaliar e compreender a influência dos fatores e interações entre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados (planejamento fatorial completo); (ii) para investigar a possibilidade de estimar os valores das propriedades físicas e mecânicas em função da densidade dos painéis (modelos de regressão); (iii) para avaliar a possibilidade de se encontrarem soluções ótimas para cada propriedade com o uso de modelos quadráticos (superfície de resposta).

Os fatores (e níveis associados) investigados consistiram na densidade nominal dos painéis [ρ_n] (0,60; 0,70; 0,80g/cm³), nas frações de resíduo epóxi [%R] (20%, 30%, 40%) e nas frações de madeira de Teca [%T] (0%; 25%; 50%; 75%; 100%), resultando em um planejamento fatorial completo (3² x 5¹) com 45 tratamentos (Tr), explicitados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tratamentos delineados do planejamento experimental.

Tratamento	Densidade - ρ_n (g/cm³)	Teor de resíduo (%)	Adição de Teca (%)
1	0,6	20	0
2	0,6	20	25
3	0,6	20	50
4	0,6	20	75
5	0,6	20	100
6	0,6	30	0
7	0,6	30	25
8	0,6	30	50
9	0,6	30	75
10	0,6	30	100
11	0,6	40	0
12	0,6	40	25
13	0,6	40	50
14	0,6	40	75
15	0,6	40	100
16	0,7	20	0
17	0,7	20	25
18	0,7	20	50
19	0,7	20	75
20	0,7	20	100
21	0,7	30	0
22	0,7	30	25
23	0,7	30	50
24	0,7	30	75
25	0,7	30	100
26	0,7	40	0
27	0,7	40	25
28	0,7	40	50
29	0,7	40	75
30	0,7	40	100
31	0,8	20	0
32	0,8	20	25
33	0,8	20	50
34	0,8	20	75
35	0,8	20	100
36	0,8	30	0
37	0,8	30	25
38	0,8	30	50
39	0,8	30	75
40	0,8	30	100
41	0,8	40	0
42	0,8	40	25
43	0,8	40	50
44	0,8	40	75
45	0,8	40	100

Fonte: Autoria própria

As propriedades físicas consideradas foram: densidade (ρ); IE2h e IE24h, Ab2h, Ab24h. No caso das propriedades mecânicas, citam-se: MOE, MOR, TP, RAPf e RAPt.

Para investigar a influência dos três fatores [ρ_n , %R, %T] e a interação entre ambos nas propriedades físicas e mecânicas foi-se utilizada a análise de variância (ANOVA), considerada ao nível de 5% de significância (α), consistindo na equivalência das médias dos tratamentos como hipótese nula (H_0), e na não equivalência de pelo menos duas das médias como hipótese alternativa (H_1). Pela formulação da ANOVA, avaliada com auxílio do software Minitab[®], versão 14, P-valor inferior ao nível de significância ($\alpha = 0,05$) implica em refutar H_0 (pelo menos uma das médias se difere das demais), aceitando-a em caso contrário (P-valor > 0,05 = as médias dos tratamentos são estaticamente equivalentes). Para validação da ANOVA foram testadas a normalidade na distribuição dos resíduos por propriedade investigada (teste de Anderson-Darling - AD) e a homogeneidade das variâncias dos resíduos dos tratamentos (teste de Bartlett - Bt).

Para os fatores individuais considerados significativos pela ANOVA (P-valor < 0,05), o teste de comparações múltiplas de Tukey foi empregado, objetivando-se agrupar os níveis do fator. Do teste de Tukey, (A) representa o nível do fator de maior média, (B) o nível do fator associado à segunda maior média e (C) o nível do fator associado à terceira maior média. Letras iguais implicam tratamentos com médias equivalentes. Considerada significativa a interação entre os fatores pela ANOVA, gráficos de interação entre fatores foram utilizados como forma de auxiliar na interpretação resultados.

Com relação ao número de réplicas, embasados nos estudos de Bertolini (2014); Souza (2012) e Varanda (2012), três painéis (dimensões 300 × 300 × 12 mm) foram fabricados para cada um dos 45 tratamentos estipulados, resultando em 135 painéis. Para determinar a resistência ao arrancamento de parafuso, de face e de topo, foi extraída 1 amostra de cada painel (três amostras por tratamento), totalizando 135 amostras para a determinação da RAPf e outras 135 para a determinação da RAPt. Para as demais propriedades foram extraídas três amostras por painel (3 painéis) e por tratamento (45 tratamentos), resultando em 405 determinações para cada uma das demais propriedades [ρ , IE2h; IE24h; Ab2h; Ab24h; MOE, MOR, RTP], perfazendo um total de 3780 determinações.

4.2.2 Produção dos painéis OSB

A produção dos painéis OSB em laboratório foi dividida em três etapas: obtenção das partículas, estudo preliminar e considerações sobre o estudo preliminar.

4.2.2.1 Obtenção das partículas

O processo de produção seguiu o procedimento proposto por Mendes (2001) e Souza (2012) e Ferro et al. (2015), no qual, inicialmente, dos rejeitos de madeira de *Pinus* sp. e Teca, já com teor de umidade 12%, foram seccionadas peças de 90 mm de largura e 45 mm de espessura. Com isto, definiram-se o comprimento e a largura das tiras de madeira (strands), respectivamente. Os strands foram gerados com espessuras entre 0,40 e 0,90 mm em um picador de disco. Na Figura 28 é mostrado os rejeitos de madeira seccionados nas dimensões citadas juntamente com os strands.

Figura 28 - Rejeitos de madeira transformados em strands.
Fonte: Autoria própria

4.2.2.2 Estudos preliminares

A etapa preliminar teve como objetivo estudar algumas condições de processamento e composição dos painéis OSB, de forma a definir os fatores e metodologia a aplicar na etapa principal do estudo. Na Tabela 5 são mostrados os parâmetros utilizados na produção dos

painéis OSB, observando-se que, com exceção da temperatura de prensagem, as condições são as mesmas para os dois tipos de adesivo.

Tabela 5 - Delineamento experimental da produção dos painéis OSB.

Painéis	Massa partícula (g)	Teor de adesivo*	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Pressão (MPa)
PHB	1300	20%	160	10	4
Epóxi	1300	20%	190	10	4

Fonte: Autoria própria

A proposta do presente trabalho foi produzir painéis com três camadas, sendo as camadas externas com strands alinhados na mesma direção e a camada interna assumindo uma distribuição randômica. Com base nos trabalhos de Cloutier (1998), Iwakiri et al. (2002), Souza (2012) e Ferro (2013) optou-se pela proporção (face/miolo/face) na faixa de 20:60:20, com base na percentagem de peso seco de partículas a encolar.

Após a aferição das massas nas proporções estabelecidas, os strands e os adesivos foram contidos em uma encoladeira, onde houve mistura por cinco minutos. Logo em seguida, realizou-se a orientação e a formação do colchão de partículas, a pré-prensagem e a prensagem a quente. Parte dos procedimentos realizados e os equipamentos utilizados para gerar, orientar e pré-prensar os strands são mostrados na Figura 29.

Figura 29 - Geração das partículas, orientação, pré-prensagem.

Fonte: Autoria própria

4.2.2.3 Considerações sobre o estudo preliminar

Inicialmente, os painéis OSB seriam produzidos com baixa, média e alta densidade (0,60; 0,70 e 0,80g/cm³). Para cada densidade o teor de resíduos de tinta epóxi iria variar em três níveis e, para cada teor de resíduo de tinta, haveria cinco variações nas proporções de adição de partículas de madeira Teca (0, 25, 50, 75 e 100%), assim como nos painéis aglomerados. Entretanto, os painéis não apresentaram nenhuma resistência mecânica já nas análises visuais.

Durante a produção dos painéis observou-se que a interação entre o adesivo em pó e os strands não foi suficiente para garantir uma coesão entre os mesmos. A dificuldade de distribuir o adesivo de maneira homogênea entre as tiras de madeira não foi superada, o que inviabilizou o prosseguimento da produção. Todavia, cabe ressaltar que a produção dos painéis OSB foi interrompida após numerosas tentativas que buscaram, sem o sucesso desejado, contornar as dificuldades encontradas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo contém os resultados obtidos na caracterização das partículas, nos estudos preliminares, no estudo principal e nas demais análises. Os valores das propriedades físicas e mecânicas foram comparados com os requisitos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 14810:2 (2013) e ANSI A208.1 (2009), entretanto dando maior ênfase a norma brasileira, já que os procedimentos de ensaio foram nela baseados. Os resultados também foram comparados com os obtidos por outros autores em trabalhos com alguma semelhança ao aqui desenvolvido.

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS PARTÍCULAS

Os resultados referentes aos testes realizados para caracterização das partículas de madeira que constituíram os aglomerados serão apresentados nas subseções a seguir.

5.1.1 Teor de umidade

Os resultados obtidos para o teor de umidade das partículas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Teor de umidade das partículas de *Pinus* sp. e Teca

Amostra	<i>Pinus</i> sp.	Teca
	TU (%)	TU (%)
1	5,30	5,60
2	4,60	5,70
3	6,10	5,10
Média	5,33	5,47
CV (%)	14,07	5,88

onde: TU = teor de umidade e CV = coeficiente de variação.

Fonte: Autoria própria

Como se observa, o teor de umidade médio das partículas de *Pinus* foi de 5,33%, já para as partículas de Teca foi de 5,47%, vale destacar o baixo valor dos coeficientes de variação, em ambos os casos. Em comparação com os estudos de Zheng et al. (2005), Ashori et al. (2008) e Iwakiri et al. (2008), que também fizeram uso da resina ureia-formaldeído, os resultados encontrados no presente estudos foram análogos.

O controle do teor de umidade das partículas é imprescindível durante a produção dos painéis, visto que os teores superiores podem gerar prejuízos aos painéis, causando excesso de vapor, surgimento de bolhas e explosões durante a prensagem, enquanto que variações inferiores podem causar deficiências na adesão entre partículas, influenciando negativamente no desempenho físico-mecânico (BOWYER; SHMULSKY; HAYGREEN, 2003).

5.1.2 Análise de granulométrica

A análise granulométrica foi realizada com as partículas de *Pinus* e Teca, retirando três amostras de 200 gramas cada um dos materiais. Na Figura 30, os valores médios para granulometria das partículas de madeira em questão são mostrados.

Figura 30 - Gráfico das análises granulométricas das partículas de *Pinus* e Teca.
Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados contidos na Figura 30, nota-se que para as partículas de Teca predominam dimensões entre 0,595 e 1,19 mm, o que corresponde a 31,9% e 42,1%, respectivamente. Já as partículas de *Pinus* com dimensões 0,595mm foram predominantes (62,3%). Ainda a respeito da madeira de *Pinus*, os resultados encontrados estão de acordo com os estudos de Bertolini (2011; 2014) e Varanda (2016).

5.2 ESTUDOS PRELIMINARES

Nesta seção, os resultados dos estudos preliminares, cujos objetivos foram determinar a temperatura, o tempo e o teor mínimo de adesivo a serem adotados nos testes principais, serão apresentados. Para realização dos testes, os painéis foram produzidos de acordo com os delineamentos experimentais preliminares mostrados nas Tabelas 1 e 2 (item 4.2.1.2). Vale destacar que cada valor apresentado nos gráficos dos ensaios de flexão estática (MOE e MOR) e tração perpendicular às faces (TP) representa a média de nove corpos-de-prova (CPs). Já nos testes de resistência ao arrancamento de parafusos face e topo (RAPf e RAPt, respectivamente) cada valor mostra a média de três CPs.

5.2.1 Painéis aglomerados tendo o resíduo de tinta à base de resina epóxi como adesivo

Os resultados dos testes de resistência à tração perpendicular (TP) e os requisitos mínimos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208-1 (2009) são mostrados na Figura 3.

Figura 31 - Gráfico com os resultados médios da resistência à tração perpendicular à face, painéis fabricados com resíduo de tinta como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Conforme se observa, os valores médios da tração perpendicular às faces variaram de 0,45 a 1,46 MPa. Em comparação com os requisitos da NBR 14810:2 (2013), todos os resultados foram superiores. No entanto, apenas os painéis prensados por 10 minutos a

190°C superaram o que prescreve a A208-1 (2009). Sobre o teor de resíduos, os painéis com 20% (190°C) ficaram três vezes e meia acima da norma brasileira.

Nas Figuras 32 e 33, os resultados dos testes dos ensaios de resistência ao arrancamento de parafusos face e topo (RAPf e RAPt, respectivamente) junto com os respectivos requisitos normativos são mostrados.

Figura 32 - Gráfico com os resultados médios da resistência ao arrancamento de parafusos face, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Figura 33 - Gráfico com os resultados médios da resistência ao arrancamento de parafusos topo, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Como se observa, nas Figuras 32 e 33, os valores médios de RAPf e RAPt variaram de 340 a 800 N e de 150 a 450 N, respectivamente, valores bem abaixo dos requisitos normativos

(NBR 14810:2 e A208-1). Apesar do fraco desempenho, os painéis com 20% de resíduo de tinta, prensados por 10 minutos a 190°C, apresentaram melhores resultados.

Nas Figuras 34 e 35, respectivamente, os resultados dos testes preliminares para MOR e MOE na flexão estática junto com os requisitos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208-1 (2009) .

Figura 34 - Gráfico com os resultados médios do MOR na flexão estática, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Figura 35 - Gráfico com os resultados médios do MOE na flexão estática, painéis fabricados com resíduo de tinta epóxi como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Como se observa nas Figuras 34 e 35, os valores médios dos MOR e MOE variaram de 3 a 11 MPa, e de 540 a 1215 MPa, respectivamente. Os painéis com 20%, prensados por 10 minutos a 190°C, foram ligeiramente superiores. No entanto, comparados aos documentos normativos 14810:2 (2013) e A208-1 (2009) não apresentaram bom desempenho.

Sobre os painéis prensados por 15 minutos, não foi possível retirá-los do molde sem danificá-los, pois os mesmos apresentavam aspecto pastoso, devido ao tempo e à alta temperatura de prensagem, o que descartou a possibilidade dos testes mecânicos.

Em relação às propriedades mecânicas, a partir dos resultados dos estudos preliminares, observou-se que os painéis com 20% (resíduos epóxi), prensados por 10 minutos a 190°C, apresentaram melhores resultados. Porém, com exceção da resistência à tração perpendicular, os resultados ficaram abaixo dos estipulados pelos documentos normativos. Diante disso, para garantir as propriedades mecânicas mínimas dos painéis estudados, foram adicionados 5% de resina ureia-formaldeído (teor sólidos de 65%) em cada painel, com base na massa seca das partículas.

5.2.2 Painéis aglomerados tendo Polihidroxibutirato (PHB) como adesivo

Os resultados dos testes para a determinação da resistência à tração perpendicular realizados nos painéis, tendo PHB como adesivo, são mostrados na Figura 36. Juntamente com os requisitos mínimos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208-1 (2009).

Figura 36 - Gráfico com os resultados médios dos ensaios de tração perpendicular às faces, painéis fabricados com PHB como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que os valores médios da resistência à tração perpendicular variaram de 0,10 a 0,29 MPa (Figura 36). Em comparação com as normas NBR 14810:2 (2013) e A208-1

(2009) todos os resultados foram inferiores. Entre os parâmetros estudados nota-se uma pequena superioridade nos painéis com 20% de PHB, prensados por 10 minutos a 190°C.

Nas Figuras 37 e 38 são mostrados, respectivamente, os resultados dos testes preliminares para determinação da resistência ao arrancamento de parafusos, face e topo. Também estão indicados os requisitos normativos da NBR 14810:2 (2013) e da A208-1 (2009).

Figura 37 - Gráfico com os resultados médios dos ensaios de resistência ao arrancamento de parafusos face, painéis fabricados com PHB como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Gráfico com os resultados médios dos ensaios de resistência ao arrancamento de parafusos topo, painéis fabricados com painéis PHB como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Conforme se observa nas Figuras 37 e 38, os resultados da resistência ao arrancamento de parafusos face e topo variaram de 410 a 694 N e de 223 a 515 N, respectivamente. Todos os valores ficaram aquém dos requisitos mínimos da NBR 14810:2 (2013) e da A208-1

(2009). Os painéis com 20%, prensados por 10 minutos a 190°C, apresentaram melhores resultados em ambos os casos.

Nas Figuras 39 e 40 são mostrados, respectivamente, os resultados dos testes preliminares para determinação de MOR e MOE, na flexão estática, bem como os requisitos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208-1 (2009).

Figura 39 - Gráfico com os resultados médios dos módulos de resistência (MOR) na flexão estática, painéis fabricados com painéis tendo PHB como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Gráfico com os resultados médios dos módulos de elasticidade (MOR) na flexão estática, painéis fabricados com painéis tendo PHB como adesivo.

Fonte: Autoria própria

Como se observa (Figuras 39 e 40), os resultados dos módulos de resistência e de elasticidade variaram de 3 a 11 MPa e de 540 a 1215 MPa, respectivamente. Os painéis com 20%, prensados por 10 minutos a 190°C, foram ligeiramente superiores. No

entanto, em comparação aos documentos normativos 14810:2 (2013) e A208-1 (2009) não apresentaram bom desempenho.

Com relação aos painéis produzidos com o tempo de prensagem de 15 minutos, observou-se, em análise visual, que os mesmos não apresentariam nenhuma resistência, dada a condição de esfarelamento das amostras, o que descartou os testes mecânicos.

Sobre as propriedades investigadas, pôde-se observar que, independentemente do teor de PHB e da temperatura, os painéis prensados por 10 minutos apresentaram os melhores resultados. No entanto, ainda estão distantes dos requisitos mínimos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208-1 (2009).

Diante das dificuldades no decorrer do processo de produção e também pelos baixos resultados, constatou-se a utilização do PHB como adesivo é inviável dentro das condições estudadas neste trabalho. Deste modo, conforme já mencionado no item 4.2.1.3, descartou-se a produção dos painéis principais com este polímero.

5.3 ENSAIOS PRINCIPAIS

O estudo principal teve como objetivo determinar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos conforme o delineamento experimental (Tabela 4). Os resultados dos testes estão apresentados da seguinte forma: propriedades físicas, mecânicas e demais análises (microscopia eletrônica de varredura e análise de porosimetria).

5.3.1 Propriedades físicas dos painéis aglomerados

Nesta subseção serão apresentados os resultados e as análises estatísticas obtidos nos testes físicos. Todavia, vale destacar que, com exceção do teor de umidade, para cada propriedade física investigada foram estudadas 45 condições experimentais (conforme é mostrado na Tabela 4), e cada tratamento mostrado nos gráficos representa a média de nove CPs, o que totaliza 405 ensaios para cada propriedade. O número de replicas para cada ensaio foi embasados nos estudos de Nascimento (2003), Bertolini (2011) e Varanda (2012).

5.3.1.1 Teor de umidade

Para verificar o TU médio dos painéis do estudo principal, um corpo-de-prova foi retirado em cada um dos dez painéis selecionados aleatoriamente dentre os 135 painéis produzidos. Os resultados da propriedade TU dos painéis não foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Na Tabela 7, os resultados do TU dos painéis são mostrado.

Tabela 7 - Teor de umidade dos painéis de partículas.

Amostra	TU (%)
1	7,9
2	8,1
3	8,3
4	8,0
5	7,1
6	9,0
7	7,9
8	7,5
9	7,3
10	7,8
Média	7,9
CV (%)	6,8

Onde: TU = teor de umidade dos painéis e CV = coeficiente de variação das dez amostras.

Fonte: Autoria própria

Determinou-se o teor de umidade dos painéis para conhecer a umidade em que foram determinadas suas propriedades físico-mecânicas, visto que o teor de umidade exerce influência nas propriedades dos painéis à base de madeira. Nos estudos de Soratto et al. (2013) e Weber e Iwakiri (2015), o teor de umidade nos painéis aglomerados produzidos com resina ureia-formaldeído variaram entre 7,3 a 10,45%, deste modo, o valor médio encontrado no presente trabalho está em consonância com estes autores.

De acordo com Silva et al. (2006), após a produção (reconstituição da madeira), ocorre redução da umidade de equilíbrio dos painéis, se comparada à madeira sólida. Tal redução (ou diminuição da higroscopicidade) se deve à fragmentação da madeira em partículas e a posterior incorporação de adesivos, outros aditivos e, especialmente, pela aplicação de altas temperaturas e pressões durante a prensagem e consolidação do painel.

5.3.1.2 Densidade

Os valores médios da propriedade densidade (ρ) dos painéis fabricados nos 45 tratamentos delineados (Tabela 4) são mostrados na Figura 41.

Figura 41 - Valores médios da densidade dos painéis.

Fonte: Autoria própria

Como se observa na Figura 41, os valores médios das densidades dos painéis ficaram entre 0,55 a 0,89 kg/cm³, e os coeficientes de variação de 3,56 a 13,22%. De acordo com os documentos normativos NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009), os painéis de partículas de madeira são classificados da seguinte forma: até 0,59 g/cm³ baixa densidade, de 0,60 a 0,79 g/cm³ média densidade e, acima de 0,80 g/cm³, alta densidade.

Percebe-se nos tratamentos 1 a 15, correspondentes aos painéis de densidade baixa (Tabela 4), que parte dos valores médios está acima de 0,59 g/cm³, o que não se enquadra nas normas citadas. Já para nos painéis de densidade média (tratamentos 16 a 30), a maioria dos painéis está coerente com as normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009). Nos painéis de densidade alta (tratamentos 31 a 45), com exceção do tratamento 31, todos estão em concordância com as normas citadas.

Para melhor distinção entre os painéis produzidos com densidade baixa, média e alta foram utilizadas as cores azul claro, azul e cinza, respectivamente.

5.3.1.3 Inchamento em espessura

Na Figura 42 é mostrado o gráfico com os valores médios do inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água.

Figura 42 - Valores médios do inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 42, os valores médios do inchamento após 2 horas de imersão em água dos painéis variaram de 1,56 a 10,18%, e os coeficientes de variação de 7,09 a 36,98%. Em linhas gerais, observa-se que 40 tratamentos ficaram com inchamento abaixo de 6%, e os painéis de densidade média com 30% (tratamentos 23 a 25) e 40% de resíduo de tinta (tratamentos 26 a 30) levaram a melhores resultados.

De acordo com Albuquerque (2002) e Guimarães Júnior (2008), os painéis mais densos possuem maior quantidade de partículas sofrendo compressão, deste modo, quando a água entra nestas estruturas causa liberação dessas forças, promovendo maiores inchamento em espessura. Entretanto, nos painéis produzidos neste estudo a propriedade I2h diminuiu com o aumento da densidade dos painéis, isso pode ser atribuído à diminuição dos espaços vazios entre as partículas, o que possibilitou uma maior ligação entre elas e o resíduo de tinta epóxi.

Os valores médios do inchamento em espessura após 24 horas de imersão de água são mostrados na Figura 43 juntamente com o requisito da norma NBR 14810:2 (2013).

Figura 43 - Valores médios do inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água.

Fonte: Autoria própria

Conforme se observa na Figura 43, os valores médios do inchamento dos painéis, após 24 horas de imersão em água, variaram de 4,24 a 14,46%, e os coeficientes de variação de 8,87 a 42,43%. Percebe-se que apenas 11 tratamentos ficaram acima dos 10% estabelecidos, pela NBR 14810:2 (2013), para painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes úmidos.

Analisando o gráfico percebe-se que em todos os níveis de densidades houve uma tendência de queda no inchamento com o aumento do teor de resíduo de tinta, o que comprova a eficiência da força de ligação entre o resíduo de tinta e as partículas de madeira ao impedir a liberação das forças de compressão presentes no interior dos painéis.

Na Tabela 8, os valores encontrados em outros estudos para efeito de comparação são apresentados.

Tabela 8 - Resultados do inchamento em espessura após 2 e 24 horas referentes a outros estudos.

Autores	Tipo de adesivo	IE2h (%)	IE24h (%)	ρ (kg/m³)
Elbadawi et al.(2015)	UF – 5 a 15%	37,31 a 41,80	42,85 a 47,63	640 a 658
Ashori et al. (2008)	UF – 9 a 11%	13,6 a 29,7	15,5 a 32,8	750
Fiorelli et al. (2015)	UF – 10 e 12%	6,9 a 26,0	-	720 a 850
Varanda (2016)	PU – 11 e 13%	2,6 a 27,7	11,3 a 28,8	882 a 1066
Bertolini et al. (2014)	PU – 8 e 10%	5,39 a 10,6	8,6 a 16,3	760 a 880
Gava et al. (2015)	PU – 12%	3,7	17,1	840

onde: UF = ureia-formaldeído; PU = poliuretana à base de mamona; IE2h = inchamento em espessura após 2 horas; IE24h = inchamento em espessura após 24 horas; ρ = densidade.

Fonte: Autoria própria

Observando a Tabela 8 pode-se perceber que os valores de IE2h e IE24h horas do presente estudo apresentaram melhores resultados em relação aos estudos tendo a UF como adesivo, mesmo contendo menor quantidade deste adesivo. Em compação com os

painéis produzidos tendo PU como adesivo, os painéis produzidos neste trabalho apresentaram resultados análogos.

5.3.1.4 Absorção de água

O gráfico mostrado na Figura 44 apresenta os valores médios da absorção de água após duas horas de imersão em água.

Figura 44 - Valores médios da absorção de água após 2 horas de imersão em água.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 44 pode se observar que os valores médios absorção de água dos painéis, após duas horas de imersão, variaram de 4,17 a 79,08%, e os coeficientes de variação de 3,96 a 40,14%. Analisando o gráfico percebe-se que 19 tratamentos ficaram abaixo de 10%, outros 11 abaixo de 15% e 7 abaixo de 30% (o restante ficaram acima de 30%).

Os valores médios da absorção de água após 24 horas de imersão em água são mostrados no gráfico da Figura 45.

Figura 45 - Valores médios da absorção de água após 24 horas de imersão em água.
Fonte: Autoria própria

Como se observa na Figura 45, os valores médios da absorção, após 24 horas de imersão em água, variaram de 6,86 a 110%, e os coeficientes de variação de 12,33 a 50,28%. No gráfico é mostrado os painéis com maiores densidades apresentaram os menores valores médios de absorção. Nota-se também tendência de queda na absorção de água com o aumento do teor de resíduos de tinta, em todas as densidades investigadas.

De modo geral, os painéis com densidade baixa absorveram maiores quantidades de água em 2 e 24 horas. Este fato pode ser atribuído a menor quantidade de material para formação do colchão, o que contribui para o aumento dos espaços vazios entre as partículas, além de reduzir o contato entre as partículas, dificultando a adesão e, consequentemente, permitindo maior absorção de água.

Na Tabela 9, os valores encontrados em outros estudos para efeito de comparação são apresentados.

Tabela 9 - Resultados absorção de água após 2 e 24 horas referentes a outros estudos.

Autores	Tipo de adesivo	Ab2h (%)	Ab24h (%)	ρ (kg/m³)
Zheng et al. (2006)	UF – 7 a 16%	19,79 a 57,67	42,96 a 65,57	720
Fiorelli et al. (2015)	UF – 10 e 12%	12,8 a 69,8	-	720 a 850
Varanda (2016)	PU – 11 e 13%	2,9 a 40,5	12,8 a 43,5	882 a 1066
Gava et al. (2015)	PU – 12%	10,2	38,8	840

onde: UF = ureia-formaldeído; PU = poliuretana à base de mamona; Ab2h = absorção de água após 2 horas; Ab24h = absorção de água após 24 horas; ρ = densidade.

Fonte: Autoria própria

Em relação à propriedade de Ab2h, observa-se na Figura 44 que apenas três tratamentos ficaram acima de 40%. Deste modo, em comparação com os estudos de Zheng et al. (2006) e Fiorelli et al. (2015), que também utilizaram UF como agente ligante, os valores encontrados no presente trabalho, em grande maioria, são da mesma ordem de grandeza. Sobre a Ab24h, analisando o gráfico observa-se que 24 tratamentos tiveram inchamento até 40%, sendo assim, estão análogos aos estudos de Gava et al. (2015) e Varanda (2016).

5.3.1.5 Análise estatística das propriedades físicas

Os resultados dos testes de normalidade e de homogeneidade de variâncias dos resíduos da ANOVA, para cada propriedade física investigada, referente às 45 composições delineadas são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos testes de validação da ANOVA para as propriedades físicas.

Propriedades	ρ	IE2h	IE24h	Ab2h	Ab24h
<i>Anderson-Darling</i>	0,653	0,275	0,223	0,136	0,098
<i>Bartlett</i>	0,736	0,325	0,186	0,294	0,107

onde: IE2h = inchamento em espessura após 2 horas; IE24h = inchamento em espessura após 24 horas; Ab2h = absorção de água após 2 horas; Ab24h = absorção de água após 24 horas; ρ = densidade.

Fonte: Autoria própria

Para validação da ANOVA foram testadas a normalidade na distribuição dos resíduos por propriedade investigada (teste de Anderson-Darling - AD) e a homogeneidade das variâncias dos resíduos dos tratamentos (teste de Bartlett - Bt). Conforme se observa na Tabela 10, os p-valores obtidos nos testes de normalidade de AD e de homogeneidade de variâncias Bt dos resíduos, para todas as propriedades investigadas, foram superiores ao nível de 5% de significância, o que valida o modelo da ANOVA.

Os resultados da ANOVA para as propriedades físicas investigadas a um nível de significância de 5% (confiabilidade de 95%), conforme Montgomery (2005) são mostrados na Tabela 11. Nela os p-valores menores ou iguais a 0,05 encontram-se sublinhados. Cabe destacar que a interação entre os fatores é representada por “×”.

Tabela 11 - Resultados da ANOVA referente ao planejamento experimental das propriedades físicas.

Fatores e interações	ρ	IE2h	IE24h	Ab2h	Ab24h
ρ_n	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%R	0,083	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%T	0,101	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
$\rho_n \times \%R$	0,333	0,355	<u>0,001</u>	0,083	0,126
$\rho_n \times \%T$	0,815	<u>0,007</u>	<u>0,003</u>	0,121	0,072
$\%R \times \%T$	<u>0,008</u>	<u>0,000</u>	0,068	0,098	0,113
$\rho_n \times \%R \times \%T$	0,106	<u>0,000</u>	0,076	0,224	0,081

Onde: ρ_n = densidade; %R = teor de resíduo de tinta; %T adição de Teca; ρ = densidade; I 2h = inchamento em espessura após 2 horas; I 24h = inchamento em espessura após 24 horas; A 2h = absorção de água após 2 horas e A 24h = absorção de água após 24 horas.

Fonte: Autoria própria

Em relação ao planejamento experimental observa-se que (Tabela 11), os resultados da ANOVA mostraram que o fator densidade [ρ_n] foi influente em todas as propriedades físicas investigadas. Já os fatores teor de resíduo de tinta [%R] e fração de Teca [%T] só não influenciaram a propriedade densidade (ρ).

Sobre as interações dos fatores (Tabela 11), as propriedades que apresentaram p-valores inferiores a 0,05 foram: densidade (ρ), nas interações [%R×%T]; IE em 2 horas, nas interações [$\rho_n \times \%T$], [%R×%T] e [$\rho_n \times \%R \times \%T$] e IE 24 horas, nas interações [$\rho_n \times \%R$] e [$\rho_n \times \%T$].

Na Tabela 12, os resultados do teste de comparações múltiplas de Tukey são mostrados para as propriedades de densidade (ρ), inchamento em espessura (IE - 2 e 24 horas) e absorção de água (Ab - 2 e 24 horas)

Tabela 12 - Resultados do teste de Tukey para as propriedades ρ , IE2h e IE24h e Ab2h e Ab24h, referente ao planejamento experimental.

Propriedades	Fatores									
	ρ_n (g/cm ³)			%R (%)			%T (%)			
	0,60	0,70	0,80	20	30	40	0	25	50	75 100
ρ	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A
IE2h	A	B	B	A	B	C	A	A	B	B
IE24h	AB	B	A	A	B	C	A	AB	BC	C
Ab2h	A	B	C	A	B	B	A	A	B	B
Ab24h	A	B	C	A	B	C	A	AB	BC	C

Onde: A = nível do fator de maior média; B = nível do fator associado a segunda maior média; C = nível do fator associado a terceira maior média; letras iguais implicam em tratamentos com médias equivalentes; letras diferentes juntas representam comportamento intermediário em relação aos outros grupos; ρ_n = fator densidade; %R = fator teor de resíduo de tinta; %T = fator fração de Teca; ρ = propriedade densidade; IE2h = inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água; IE24h = inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água; Ab2h = absorção de água após 2 horas de imersão em água; Ab24h = absorção de água após 24 horas de imersão em água.

Fonte: Autoria própria

Na propriedade densidade (ρ), como se observa na Tabela 12, os resultados obtidos no teste de Tukey demonstraram que, no fator densidade [ρ_n], os níveis 0,80; 0,70 e 0,60g/cm³ apresentaram, respectivamente, a maior, a segunda e a terceira maior média. Isto era esperado, pois os cálculos dos insumos foram feitos para os painéis alcançarem estas densidades.

A interação entre os fatores considerados significativos pela ANOVA para a propriedade densidade (ρ) é mostrada na Figura 46, de acordo com a Tabela 11.

Figura 46 - Gráfico de interação entre fatores para a densidade.

Fonte: Autoria própria

O gráfico de interação (Figura 46) permitiu visualizar que os painéis produzidos com 20% de resíduo de tinta tendo 0 e 25% de partículas de Teca apresentaram menores valores médios.

Para a propriedade IE2h (Tabela 12), os resultados obtidos no teste de Tukey, para os painéis com fator densidade [ρ_n] média e alta, foram equivalentes e apresentaram menores inchamentos. Em relação ao fator teor de resíduo [%R], os painéis com 40% levaram a melhores resultados. Já sobre o fator fração de Teca [%T], os painéis com 50, 75 e 100% foram equivalentes e demonstraram baixos valores de inchamento.

Na Figura 47, os gráficos das interações para a propriedade de IE2h são mostrados (Tabela 11).

Figura 47 - Gráfico de interação entre fatores para o IE2h.
Fonte: Autoria própria

A interação entre os fatores está associada à mudança de comportamento de um fator nos diferentes níveis do outro fator, com relação à característica de interesse. Conforme se nota na Figura 47, os valores de IE2h foram inversamente proporcionais ao aumento da fração de Teca e ao teor de resíduo de tinta. Analisando os gráficos, percebe-se que os painéis produzidos com média e alta densidade, 30 e 40% de resíduo de tinta e nas proporções a partir de 50% de Teca, apresentaram melhores resultados.

Na Tabela 12 pode-se observar que, para a propriedade IE24h, os painéis com densidade alta apresentaram maiores valores nos inchamentos. Em relação ao fator teor de resíduo de tinta [%R], os painéis com 40% tiveram inchamentos menores. Já no fator fração de Teca [%T], os painéis com 75 e 100% foram equivalentes e demonstraram menores resultados nos inchamentos.

Os gráficos de interação entre fatores para o IE24h são mostrados na Figura 48 (Tabela 11).

Figura 48 - Gráficos de interação entre fatores para o inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 48a, constata-se que os painéis produzidos com o 40% de resíduo de tinta apresentaram menores valores médios de inchamento. Na figura 48b, o gráfico mostra que os painéis de média densidade com 100% de partículas de Teca tiveram melhores resultados no inchamento.

Na propriedade absorção de água após 2 horas de imersão (Tabela 12), os painéis com densidade alta tiveram menores valores de absorção. Para o fator teor de resíduo (%R), os painéis com 30 e 40% foram equivalentes e tiveram melhores desempenhos. No fator fração de Teca (%T), as proporções 50, 75 e 100% foram equivalentes e absorveram menores quantidades de água.

Na absorção 24 horas (Tabela 12), os painéis com densidade alta apresentaram menores valores no inchamento. Já no fator teor de resíduos de tinta (%R), os painéis com 40% tiveram melhores resultados. Em relação ao fator fração de Teca (%T), os painéis com 75 e 100% mostraram menor absorção de água.

Em linhas gerais, as propriedades físicas apresentaram bons resultados em comparação ao documento normativo (IE2h) e aos estudos citados, com isso pode-se assumir que os parâmetros de fabricação e os insumos utilizados foram suficientes para garantir um bom desempenho físico dos painéis produzidos no presente trabalho.

5.3.2 Propriedades mecânicas dos painéis aglomerados

Nesta subseção serão apresentados os resultados e as análises estatísticas obtidos nos testes mecânicos. Todavia, vale destacar que, para cada propriedade mecânica investigada

foram estudadas 45 condições experimentais (conforme mostra a Tabela 4). Para os ensaios de flexão estática (MOE e MOR) e tração perpendicular às faces, cada tratamento mostrado nos gráficos representa a média de nove CPs, o que totalizou 405 ensaios para cada propriedade citada. Para os ensaios de resistência ao arrancamento de parafusos, face e topo, cada tratamento mostra a média de três CPs, totalizando 135 ensaios para cada uma dessas propriedades.

5.3.2.1 Resistência na tração perpendicular às faces

Na Figura 49 é mostrado o gráfico com os valores médios da resistência na tração perpendicular às faces dos painéis fabricados nos 45 tratamentos delineados juntamente com o requisitos mínimos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009).

Figura 49 - Valores médios da resistência na tração perpendicular às faces dos painéis.

Fonte: Autoria própria

Como se observa no gráfico da Figura 49, os valores médios da resistência na tração perpendicular dos painéis variaram de 0,25 a 2,16 MPa, e os coeficientes de variação de 9,22 a 33,77%. Apenas cinco tratamentos, relacionados aos painéis de densidade baixa, não atingiram o requisito na norma brasileira NBR 14810:2 (2013). Já o requisito da norma norte americana A208-1 (2009) não foi alcançado por 20 tratamentos, sendo 12 referentes aos painéis com densidade baixa, cinco aos de densidade média e três aos de densidade alta.

Analisando o gráfico na Figura 49, percebe-se que os painéis com maiores densidades apresentaram melhores resultados, esse fato pode ser atribuído à maior compactação, o que diminui os espaços vazios e a porosidade, resultando em uma melhor colagem das partículas.

Na Tabela 13, os valores encontrados em outros estudos para efeito de comparação são mostrados.

Tabela 13 - Resultados de tração perpendicular às faces referentes a outros estudos.

Autores	Tipo de adesivo	TP (MPa)
Ashori et al. (2008)	UF – 9 a 11%	0,38 a 1,21
Atar et al. (2014)	UF – 10 e 12%	0,23 a 0,55
Soratto et al. (2013)	UF – 6 a 10%	0,50 a 0,97
Varanda (2016)	PU – 11 e 13%	0,13 a 2,72
Bertolini et al. (2014)	PU – 8 e 10%	1,59 a 2,74
Gava et al. (2015)	PU – 12%	2,68

onde: UF = ureia-formaldeído; PU = poliuretana à base de mamona e TP = tração perpendicular às faces

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar na Tabela 13 que, mesmo contendo menor quantidade de UF, os resultados encontrados no presente estudo foram, na maioria dos casos, análogos aos estudos que tiveram a UF como adesivo. Em relação aos estudos com PU, os valores mostrados no gráfico da Figura 49, no geral, estão em concordância com os autores citados.

5.3.2.2 Módulo de resistência e módulo de elasticidade na flexão estática

Os valores médios dos módulos de elasticidade na flexão estática dos painéis fabricados e os requisitos mínimos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009) são mostrados na Figura 50.

Figura 50 - Valores médios do módulo de elasticidade na flexão estática.

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar na Figura 50 que, os valores médios do módulo de elasticidade na flexão variaram de 745 a 5013 MPa, e os coeficientes de variação de 5,62 a 29,05%. Analisando o gráfico percebe-se que os painéis com densidade alta superaram, e muito, os requisitos mínimos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009). Para os painéis de densidade média, todos os painéis atenderam os requisitos da NBR 14810:2, já em comparação com o documento normativo A208-1, com exceção dos tratamentos 17 e 18, todos alcançaram o requisito mínimo. Sobre os painéis de densidade baixa, apenas os tratamentos 10 e 15 atenderam aos requisitos da NBR 14810:2 (2013), já a norma A208.1 (2009) não foi atendida por nenhum tratamento.

Na Figura 51 é mostrado o gráfico com os valores médios dos módulos de resistência na flexão estática dos painéis fabricados juntamente com os requisitos da norma NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009).

Figura 51 - Valores médios do módulo de resistência na flexão estática.

Fonte: Autoria própria

Conforme se observa na Figura 51, os valores médios do módulo de resistência na flexão estática variaram de 2,96 a 29,28 MPa, e os coeficientes de variação de 12,23 a 36,43%. Os painéis de densidade alta, com exceção do tratamento 31, superaram os requisitos normativos da NBR 14810:2 (2013) e da A208.1 (2009). Para os painéis de média densidade, apenas dois tratamentos (17 e 18) não atenderam à NBR 14810:2 e quatro (17, 18, 21 e 26) não atenderam à A208.1. Para os painéis de densidade baixa, salvo o tratamento 15, nenhum alcançou os requisitos da norma brasileira. Em comparação à A208.1, nenhum resultado foi suficiente.

No geral, analisando os gráficos das Figuras 50 e 51, percebe-se que os MOE e o MOR, de maneira geral, foram melhores nos painéis mais densos. De acordo com Iwakiri et al. (2008) e Soratto et al. (2013), o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade podem ser afetados pela densidade do painel, de modo que, elevando a densidade dos painéis resulta em incremento no módulo de ruptura, isso devido à elevação da taxa de compactação que causa o aumento dos pontos de contato entre as partículas.

Alguns autores, como Kollmann et al. (1975), Haselein (1989), Albuquerque (2002) e Iwakiri et al. (2008) confirmam terem encontrado relação linear positiva entre a massa específica dos painéis e as propriedades de resistência à flexão estática (MOR) e (MOE).

Na Tabela 14, os valores referentes a outros estudos para efeito de comparação são mostrados.

Tabela 14 - Resultados dos módulos de resistência e elasticidade referentes a outros estudos.

Autores	Tipo de adesivo	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Ashori et al. (2008)	UF - 9 a 11%	1048 a 2123	10 a 19,5
Atar et al. (2014)	UF - 10 e 12%	1746,4 a 2439,1	10,49 a 14,51
Soratto et al. (2013)	UF - 6 a 10%	1195,2 a 1713,0	11,52 a 16,11
Varanda (2016)	PU - 11 e 13%	1430 a 3110	11,5 a 31,6
Bertolini et al. (2014)	PU - 8 e 10%	1947 a 2200	17,4 a 22,5
Gava et al. (2015)	PU - 12%	859 a 2274	8,7 a 25,8

Onde: UF = ureia-formaldeído; PU = poliuretana à base de mamona; MOE = módulo de elasticidade e MOR = módulo de resistência na flexão estática.

Fonte: Autoria própria

A respeito do MOE, no gráfico da Figura 50 pode-se observar que 15 tratamentos levaram a valores médios acima de 3000 MPa, 10 acima de 4000 MPa e 1 acima de 5000 MPa. Em comparação com os estudos tendo UF como adesivo, percebe-se que os painéis

de densidade média e alta produzidos neste estudo, no geral, foram superiores. Já em relação aos estudos com PU, pode-se observar que os valores encontrados foram da mesma ordem de grandeza.

Sobre o MOR, analisando o gráfico da Figura 51 percebe-se que 12 tratamentos ficaram acima de 20 MPa, 13 acima de 15 MPa e cinco acima de 10 MPa. Assim, quando comparados com os estudos tendo UF e PU como agente ligante, observa-se que os valores encontrados no presente estudo foram análogos, mesmo contendo menor quantidade de resina UF, o que indica a eficiência dos parâmetros e insumos utilizados nesta pesquisa.

5.3.2.3 Resistência ao arrancamento de parafusos

Na Figura 52 é mostrado o gráfico com os valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de face e os requisitos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009).

Figura 52 - Valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de face.

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar, na Figura 52, que os valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de face variaram de 166,67 a 1883,33 N, e os coeficientes de variação de 4,23 a 56,72%. Nos painéis de densidade alta, todos atenderam os requisitos mínimos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009) (com exceção do tratamento 31). Já nos painéis com densidade média, apenas os tratamentos 18, 20, 23, 25, 26, 27 e 28 atenderam à NBR 14810:2, dentre eles apenas os

tratamentos 18, 20, 23, 25 e 26 atenderam à A208.1. Sobre os painéis com densidade baixa, nenhum atendeu os requisitos mínimos dos documentos citados.

De modo geral, observa-se que os painéis mais densos apresentaram melhores resultados de RAPf e RAPt, isso pode ser atribuído à redução dos espaços vazios entre as partículas e ao aumento da compactação do material.

Dacosta et al. (2005), avaliando a qualidade de painéis de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii*, observaram que o aumento da densidade dos painéis conferiu maior resistência ao teste de arrancamento de parafusos, assim como no presente estudo.

Na Figura 53 é mostrado o gráfico com os valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de topo e os requisitos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009).

Figura 53 - Valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de topo.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 53, observa-se que os valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso de topo variaram de 17,50 a 2283,33 N, e os coeficientes de variação de 7,93% a 68,24%. Analisando o gráfico percebe-se que, nos painéis de densidade alta, os valores médios, com exceção do tratamento 31, superaram os requisitos das normas NBR 14810:2 (2013) e A208.1 (2009). Nos painéis com densidade média, exceto o tratamento 21, todos os demais resultados atenderam à NBR 14810:2. Já norma a A208.1 foi atendida pelos tratamentos 18, 19, 20, 23, 25, 28, 29 e 30. Sobre os painéis com densidade baixa, salvo o tratamento 15, nenhum atendeu aos documentos normativos citados.

Para efeito de comparação, os valores de resistência ao arrancamento de parafusos encontrados em outros estudos são mostrados na Tabela 14

Tabela 15 - Resultados de resistência ao arrancamento de parafusos referentes a outros estudos.

Autores	Tipo de adesivo	APf (N)	APt (N)
Soratto et al. (2013)	UF - 6 a 10%	1532 a 2045	-
Varanda (2016)	PU – 11 e 13%	240 a 1500	260 a 2890
Bertolini (2011)	PU – 12 e 15%	1342 a 1608	2404 a 2604

Onde: UF = ureia-formaldeído; PU = poliuretano à base de mamona; APf = arrancamento de parafusos face e APt = arrancamento de parafusos topo.

Fonte: Autoria própria

Em comparação com os estudos citados na Tabela 15, percebe-se que, com exceção dos painéis com densidade baixa, os valores encontrados para as propriedades RAPf e RAPt do presente trabalho são análogos aos resultados encontrados pelo autores em questão.

5.3.2.4 Análises estatísticas das propriedades mecânicas

Os resultados dos testes de validação da ANOVA para cada propriedade mecânica investigada são mostrados na Tabela 16, referem-se às 45 composições delineadas (Tabela 4).

Tabela 16 - Resultados dos testes de validação da ANOVA para as propriedades mecânicas.

Propriedades	TP	MOE	MOR	RAPf	RAPt
<i>Anderson-Darling</i>	0,159	0,351	0,274	0,106	0,082
<i>Bartlett</i>	0,158	0,321	0,273	0,091	0,073

onde: TP = resistência à tração perpendicular; MOR = módulo de resistência na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; RAPf = resistência ao arrancamento de parafuso para face e RAPt = resistência ao arrancamento de parafuso para topo.

Fonte: Autoria própria

Conforme se observa na Tabela 16, para todas as propriedades investigadas, os p-valores foram superiores ao nível de 5% de significância. Sendo, assim fica validado o modelo da ANOVA.

Na Tabela 17, os resultados da ANOVA para as propriedades mecânicas dos painéis do presente estudo são mostrados. Encontra-se sublinhados os p-valores por propriedade considerados significativos ($<0,05$) e a interação entre os fatores é representada por “×”.

Tabela 17 - Resultados da ANOVA para o planejamento fatorial para propriedades mecânicas.

Fatores e interações	MOE	MOR	TP	RAPt	RAPf
ρ_n	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%R	<u>0,038</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	<u>0,003</u>
%T	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,105	0,078
$\rho_n \times \%R$	0,196	0,083	<u>0,003</u>	0,159	0,794
$\rho_n \times \%T$	0,112	0,214	0,770	0,468	0,162
$\%R \times \%T$	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	0,092	0,354
$\rho_n \times \%R \times \%T$	0,072	0,158	0,128	0,109	0,346

Onde: ρ_n = densidade; %R = teor de resíduo de tinta; %T = adição de Teca; TP = resistência à tração perpendicular; MOR = módulo de resistência na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; RAPf = resistência ao arrancamento de parafuso para face e RAPt = resistência ao arrancamento de parafuso para topo.

Fonte: Autoria própria

Como se observa na Tabela 17, os resultados da ANOVA mostraram que os fatores densidade [ρ_n] e teor de resíduo de tinta [%R] influenciaram todas as propriedades mecânicas investigadas. Já o fator fração de Teca [%T] só não influenciou as propriedades resistência ao arrancamento de parafusos face e topo.

A respeito das interações dos fatores (Tabela 17), as propriedades com p-valores inferiores a 0,05 foram: MOE, nas interações [%R×%T] e [$\rho_n \times \%R \times \%T$]; MOR, na interação [%R×%T] e TP, na interação [$\rho_n \times \%T$].

Os resultados do teste de comparações múltiplas de Tukey, para as propriedades TP, MOE, MOR, RAPf e RAPt são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados do teste de Tukey para as propriedades TP, MOE, MOR, RAPf e RAPt referente ao planejamento experimental.

Propriedades	Fatores										
	ρ_n (g/cm ³)			%R (%)			%T (%)				
	0,60	0,70	0,80	20	30	40	0	25	50	75	100
TP	C	B	A	B	AB	A	D	CD	BC	AB	A
MOE	C	B	A	B	A	A	B	B	AB	A	A
MOR	C	B	A	B	A	A	B	AB	AB	A	A
RAPf	C	B	A	B	AB	A	A	A	A	A	A
RAPt	C	B	A	B	B	A	A	A	A	A	A

Onde: A = nível do fator de maior média; B = nível do fator associado a segunda maior média; C = nível do fator associado a terceira maior média; letras iguais implicam em tratamentos com médias equivalentes; letras diferentes juntas representam comportamento intermediário em relação aos outros grupos; ρ_n = fator densidade; %R = fator teor de resíduo de tinta; %T = fator fração de Teca; TP = tração perpendicular; MOE = módulo de elasticidade; MOR = módulo de resistência; RAPf = resistência ao arrancamento de parafuso face e RAPt = resistência ao arrancamento de parafusos topo.

Fonte: Autoria própria

Na propriedade tração perpendicular (TP), como se observa na Tabela 18, os resultados obtidos no teste de Tukey demonstraram que os painéis com alta densidade (nível 0,80 g/cm³) levaram aos maiores valores. Em relação ao fator teor de resíduo [%R], os painéis com 40% mostraram os melhores resultados e sobre o fator fração de Teca [%T], os painéis com 100% foram os melhores.

Na Figura 54 é mostrado o gráfico de interação entre fatores para a resistência na tração perpendicular.

Figura 54 - Gráfico de interação entre fatores para a resistência na tração perpendicular.

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar, na Figura 54, que os painéis produzidos com 100% Teca tendo 30% de resíduo de tinta apresentaram os melhores resultados. Analisando o gráfico percebe-se que a melhora na propriedade tração perpendicular foi diretamente proporcional à adição de Teca nos painéis com densidade média e baixa.

Para as propriedades MOE e MOR (Tabela 18), os resultados obtidos no teste de Tukey mostraram que, no fator densidade [ρ_n], os painéis com densidade alta (nível 0,80 g/cm³) tiveram melhores resultados. Em relação ao fator teor de resíduo [%R], os painéis com 30 e 40% foram equivalentes e tiveram os maiores valores médios. Já sobre o fator fração de Teca [%T], os painéis com 75 e 100% foram equivalentes e apresentaram os valores mais altos.

Na Figura 55 é mostrado o gráfico de interação entre fatores para o módulo de elasticidade e o módulo de resistência na flexão estática.

Figura 55 - Gráfico de interação entre fatores para o módulo de elasticidade (a) e para o módulo de ruptura (b).
Fonte: Autoria própria

Conforme se observa na Figura 55a, os MOE dos painéis produzidos com 30% de resíduo de tinta foram os únicos que apresentaram crescimento diretamente proporcional ao aumento da fração de Teca, sendo os melhores resultados alcançados pelos painéis com 100% de Teca.

A respeito da propriedade MOR, ao analisar o gráfico da Figura 55b percebe-se que os painéis com 30% de resíduo de tinta sendo 100% Teca apresentaram melhores resultados, nota-se também que os valores de MOR foram diretamente proporcional ao aumento da fração de Teca.

5.4 DEMAIS ANÁLISES

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e porosimetria por intrusão serão apresentadas nas subseções a seguir.

5.4.1 Análise de microscopia eletrônica de varredura

Nesta subseção são apresentadas as imagens geradas na análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Como consta na metodologia (subitem 4.2.1.5.4), as análises de MEV foram procedidas em cinco amostras retiradas dos painéis com densidade média tendo 30% de resíduo de tinta (Tratamentos 21 a 25, ver Tabela 4).

O objetivo das análises de imagens de MEV foi mostrar a interação das partículas de madeira com o resíduo de tinta. As micrografias foram obtidas pela digitalização das superfícies fraturadas das amostras.

Uma vista geral da região rompida de um painel constituído de 100% de partículas de *Pinus* e outro com 100% de Teca é mostrada na Figura 56 (Figura 56A e 56B, respectivamente).

Figura 56 - Morfologia das superfícies das amostras, A = amostra com 100% *Pinus* e B = amostra com 100% Teca.
Fonte: Autoria própria

Conforme se observa na Figura 56, pelo aspecto da fratura percebe-se que houve rompimento das partículas de madeira, confirmando a boa interação entre as partículas e a fase matriz, formada pelo resíduo de tinta epóxi mais 5% de resina ureia-formaldeído com teor sólido de 65%.

A micrografia de um ponto na amostra com 75% de Teca e a respectiva ampliação deste ponto podem ser observadas nas Figuras 57A e B, respectivamente. Já nas Figuras 57C e D, a micrografia de um ponto e a sua respectiva ampliação foram realizadas na amostra com 100% de Teca.

Figura 57 - Morfologia das superfícies das amostras: A = amostra com 75% de teca, B = aproximação do círculo tracejado da imagem A, C = amostra com 100% de teca e D aproximação do círculo tracejado da imagem C.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 57A, que mostra as partículas de maneira mais ampla, é possível observar que o círculo tracejado é o ponto mostrado na Figura 57B. Do mesmo modo acontece na Figura 57C, que também indica o local de origem da Figura 57D. Ao analisar essas figuras, percebe-se um “molhamento” eficiente das áreas superficiais das partículas pelo adesivo, essencial nos materiais compósitos para que ocorra a distribuição de cargas entre as fibras (CALLISTER, 2006).

Nas Figuras 58A e C são mostrados dois pontos distintos uma mesma amostra, de 100% de Teca, junto com suas respectivas ampliações (B e D).

Figura 58 - Morfologia das superfícies das amostras: A e C = interfaces entre a matriz e uma partícula rompida, B = aproximação do círculo tracejado da imagem A e D aproximação do círculo tracejado da imagem C.

Fonte: Autoria própria

Na superfície fraturada mostrada na Figura 58A observa-se um círculo tracejado que indica o rompimento de uma partícula de madeira. Ao aproximar a imagem (Figura 58B), os detalhes revelam a interface entre a matriz e a partícula rompida. Isso deixa evidente a força de aderência da matriz, pois houve o rompimento das paredes das fibras da madeira. Esse fato reforça ainda mais o bom desempenho do insumo alternativo usado na produção de painéis aglomerados.

Na Figura 58C pode-se observar que houve arrancamento de duas partículas ligadas pelo adesivo. Com a aproximação (Figura 58D) percebe-se, novamente, que a força da ligação da interface fibra/matriz foi comprovada com o rompimento das fibras da madeira, o que explica os excelentes resultados encontrados nos testes mecânicos.

5.4.2 Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio

Na Tabela 19, as propriedades porosimétricas dos materiais avaliados são mostradas.

Tabela 19 - Propriedades porosimétricas das amostras analisadas.

Propriedades porosimétricas	Tratamentos				
	21	22	23	24	25
Área total de poros (m ² /g)	11,44	9,14	8,61	22,72	7,71
Diâmetro médio dos poros em volume (μm)	12,05	15,23	16,67	7,13	9,33
Densidade aparente (g/mL)	1,32	1,27	1,28	1,39	1,22
Porosidade (%)	34,98	41,52	46,07	46,08	40,72

onde: os tratamentos 21 = 0% de Teca; 22 = 25% de Teca; 23 = 50% de Teca; 24 = 75% de Teca e 25 = 100% de Teca.

Fonte: Autoria própria

Como se observa na Tabela 19, as áreas totais de poros e a densidade aparente das amostras referentes aos painéis contendo 75 e 100% de Teca apresentaram, respectivamente, os maiores e menores resultados (22,72 e 7,71 m²/g; 1,39 e 1,22 g/mL). Sobre o diâmetro médio dos poros, as amostras com 75 e 100% apresentaram menor e maior valor (7,13 e 9,33 μm, respectivamente). A respeito da porosidade, a amostra contendo apenas partículas de *Pinus* teve o menor resultado (34,98%) e as amostras com 50 e 75% de Teca tiveram os valores mais altos (46,07 e 46,08%, respectivamente).

Para efeito de comparação, na Tabela 20, os valores de outros estudos são mostrados.

Tabela 20 - Propriedades porosimétricas encontradas em outros estudos.

Outros estudos	Propriedades porosimétricas			
	ATP (m ² /g)	DA (g/mL)	DMP (μm)	Porosidade (%)
Bertolini (2014)	9,23 a 16,47	1,35 a 1,6	13,98 a 32,56	11,78 a 55,7
Varanda (2016)	10,98 a 21,73	1,27 a 1,49	4,77 a 13,61	27,0 a 33,7

onde: DMP = diâmetro médio dos poros; ATP = área total de poros e DA = densidade aparente.

Fonte: Autoria própria

Em comparação com os resultados obtidos por Bertolini (2014) e Varanda (2016) (Tabela 20), os quais a pressão de prensagem dos painéis foi de 4 MPa, os valores encontrados no presente estudo mostraram-se análogos.

De acordo com Callister (2006), nos materiais cerâmicos existe uma relação entre a maior incidência de poros como efeito negativo sobre a resistência mecânica do material. Entretanto, ao analisar os resultados mecânicos referentes aos tratamentos da Tabela 19, não se pôde afirmar que a fração volumétrica da porosidade teve influência, pois seria necessária maior amostragem para se obter uma relação por meio de regressão linear.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Baseando-se na metodologia aplicada e resultados obtidos para as partículas de *Pinus* sp, *Tectona grandis* e para os painéis derivados das mesmas, é possível registrar as seguintes conclusões:

- Sobre as propriedades físicas das partículas

- As partículas empregadas possuem características morfológicas e físicas em conformidade para a produção dos painéis de partículas. Em termos de umidade, os valores médios para o *Pinus* e para a *Tectona grandis* foram de 5,33% e 5,47%, respectivamente, condizentes com outros trabalhos citados. Considerando-se a distribuição granulométrica das partículas, grande parte destas encontrava-se em faixas de tamanho consideradas apropriadas, de 0,595mm a 1,19mm (16 a 30 mesh), conforme trabalhos mencionados de outros autores.

- Sobre os estudos preliminares

- A respeito dos testes preliminares dos aglomerados tendo o resíduo de tinta como agente ligante, observou-se que o teor de resíduo de 20%, a temperatura e tempo de prensagem de 190 °C e 10 minutos, respectivamente, apresentaram melhores resultados. Entretanto, mecanicamente os painéis foram inferiores aos requisitos normativos, salvo a adesão interna que em alguns casos foram superiores. Deste modo, visando atingir os requisitos normativos mínimos, nos painéis do estudo principal, adicionou-se 5% de resina ureia-formaldeído, com base na massa seca das partículas;
- Em relação aos aglomerados tendo polihidroxibutirato (PHB) como adesivo, observou-se que durante a produção houve a necessidade de realizar vários ciclos de prensagem visando a desgaseificação, no entanto, ainda assim, diversos painéis foram danificados pela fuga dos gases aprisionados no seu interior durante a abertura da prensa ao fim do processo, o que gerou grande dificuldade para alcançar o delineamento experimental preliminar proposto. Sobre as propriedades mecânicas investigadas, os resultados ficaram aquém dos estabelecidos pelas normas, neste sentido, optou-se pela não continuidade do estudo com este material, uma vez que já nos testes preliminares foi possível concluir que sua

produção com os parâmetros descritos neste trabalho é inviável em termos de resistência mecânica e custo.

- Sobre o estudo principal

- Em relação às propriedades físicas dos painéis, observou-se que nos painéis produzidos com intuito de atingirem baixa densidade ($<600\text{g/cm}^3$)m quatro dos 15 tratamentos foram coerentes com a norma a ABNT NBR 14810:2 (2013). Quanto aos painéis fabricados para alcançarem a média densidade (600 a 799g/cm^3), 12 tratamentos ficaram de acordo com documento normativo citado. Já sobre os painéis confeccionados buscando densidade acima de 800g/cm^3 , 14 tratamentos foram considerados coerentes com a norma brasileira;
- Considerando-se a propriedade de inchamento em espessura 24h, os valores encontrados para a maioria dos tratamentos foram altamente satisfatórios em relação ao preconizado na norma brasileira. Já as propriedades inchamento em espessura 2h e absorção de água (para 2 e 24h) não possuem requisitos normativos, porém os resultados encontrados em comparação com outros estudos podem ser considerados da mesmo ordem de grandeza;
- Em termos de propriedades mecânicas dos painéis, observou-se que, para a tração perpendicular às faces 39 dos 45 tratamentos avaliados foram superiores à norma ABNT NBR 14810:2 (2013). Os tratamentos 5, 10, 14, 15, 19, 20, 22, 23, 26, 27, 30, 32, 33 e 36 alcançaram valores duas vezes acima do documento normativo brasileiro, já os tratamentos 24, 25, 28, 29, 34, 35 e 38, 39, 40, 41, 42, 42, 44 e 45 atingiram valores que excederam em até três vezes a norma citada. Em comparação com a norma norte americana ANSI A208.1 (2009), 25 tratamentos tiveram valores acima do estipulado, sendo que os tratamentos 25, 42, 43 e 45 ficaram com valores duas vezes acima do requisito mínimo. De modo geral, os painéis produzidos com densidade acima de 700 g/cm^3 apresentaram valores acima dos estipulados na literatura mencionada;
- A respeito do módulo de elasticidade, 32 tratamentos foram considerados satisfatórios, em comparação aos requisitos norma brasileira ABNT NBR 14810:2 (2013). Os tratamentos 19, 20, 22, 23, 25, 28, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45 atingiram valores duas vezes acima do preconizado na norma citada. Em relação à norma ANSI A208.1 (2009), 27 superaram

o preconizado, sendo que os tratamentos 19, 20, 22, 23, 25, 28, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45 alcançaram valores uma vez e meia acima do requisito estipulado. Em linhas gerais, os painéis produzidos com densidade acima de 700 g/cm³ também apresentaram valores acima dos estudos mencionados.

- Sobre o módulo de resistência, 19 tratamentos foram superiores ao documento normativo ABNT NBR 14810:2 (2013). Em relação a ANSI A208.1 (2009), 23 superaram o valor recomendado. De maneira geral, os painéis produzidos com densidade acima de 700 g/cm³ apresentaram valores análogos aos estudos utilizados como parâmetro.
- Quanto ao arrancamento de parafusos face, 21 tratamentos atingiram os valores indicados pela norma brasileira ABNT NBR 14810:2 (2013) e 19 atenderam à norma norte americana ANSI A208.1 (2009). Para o arrancamento de parafusos topo, 29 superaram o preceito da norma brasileira e 23 o da norma norte americana. No geral, os painéis produzidos com densidade acima de 700 g/cm³ apresentaram valores da mesma ordem de grandeza dos estudos citados.
- Quanto à análise estatística das propriedades físico-mecânicas avaliadas, os fatores individuais (densidade, teor de adesivo e fração de Teca) foram significativos, a um nível de significância de 5%, na maioria das propriedades avaliadas. As interações entre fatores dois a dois (densidade x teor de resíduo de tinta; densidade x fração de Teca; teor de resíduo x fração de Teca) foram significativas em três propriedades físicas e em três propriedades mecânicas avaliadas. A interação entre fatores tríplice (densidade x teor de resíduo de tinta x fração de Teca) foi significativa apenas na propriedade módulo de elasticidade (MOE);
- Os tratamentos 21 a 25, selecionados pelos motivos descritos no item 4.2.1.5.4, apresentaram uma boa interação entre as partículas de madeira e a matriz formada pelo resíduo de tinta e pelos 5% de resina ureia-formaldeído, conforme destacado pelo procedimento de MEV. De acordo com a porosimetria por intrusão de mercúrio, concluiu-se que estes materiais são porosos, entretanto seria necessária a análise de diversas amostras para associar esta propriedade à perda de resistência, conforme definido para materiais cerâmicos, por exemplo.

Diante destes argumentos, conclui-se que é viável a produção dos aglomerados com densidade acima de 700 g/cm³ empregando-se resíduos de madeira de *Pinus* sp. e *Tectona grandis* (Teca) juntamente com o resíduo de tinta (proveniente de pintura eletrostática em pó)

à base de resina epóxi. Os resultados dos testes físicos e mecânicos mostraram que as propriedades investigadas, em grande parte dos tratamentos, superaram os requisitos normativos e os estudos dos autores citados. Na Tabela 21, a classificação dos painéis de partículas de média densidade, de acordo com o documento normativo brasileiro NBR 14810:2 (2013), e os valores médios encontrados nos tratamentos estudados são mostrados.

Tabela 21 - Classificados dos painéis de partículas de média densidade (NBR 14810:2, 2013) e os valores médios encontrados nos tratamentos estudados.

Propriedades	Classificação dos painéis (NBR 14810:2)						Tratamentos (valores médios)		
	P2	P3	P4	P5	P6	P7	1 a 15	15 a 30	30 a 45
IE 24h (%)	18	17	16	11	16	10	8,26	7,69	8,60
TP (MPa)	0,4	0,45	0,40	0,45	0,60	0,75	0,58	1,06	1,38
MOR (MPa)	11	15	16	18	20	22	7	17	20
MOE (MPa)	1800	2060	2320	2660	3150	3360	1290	3250	4082

Onde: P2 - painéis não estrutural para uso em condições secas; P3 - painéis não estrutural para uso em condições úmidas; P4 - painéis estruturais para uso em condições secas; P5 - painéis estruturais para uso em condições úmidas; P6 - painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos; P7 - painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes úmidos.

Fonte: Autoria própria

Diante dos resultados positivos encontrados neste estudo, pode-se dizer que a utilização desse produto, principalmente, pela indústria moveleira pode ser considerada factível, o que pode contribuir para redução de emissão de formaldeído, uma vez que a porcentagem utilizada é muito inferior à usualmente praticada pelas indústrias e pelas pesquisas acadêmicas. Além disso, outro ponto importante é a possibilidade de gerenciar de maneira ambientalmente correta este resíduo sólido, agregando valor ao mesmo.

Baseando-se na metodologia aplicada e resultados obtidos nos estudos preliminares dos painéis OSB, é possível registrar as seguintes conclusões:

- Durante a produção dos painéis observou-se que a interação entre o adesivo em pó e os strands não foi suficiente para garantir uma coesão entre os mesmos. Isso pode ser atribuído às dimensões das tiras de madeira, pois durante o processo de mistura observou-se que a distribuição dos adesivos nas superfícies das partículas não era homogênea e os painéis não apresentavam nenhuma resistência mecânica após a etapa de prensagem. Deste modo, optou-se pela não continuidade do estudo com este material, uma vez que já nos testes

preliminares foi possível concluir a produção nos parâmetros descritos no presente trabalho é inviável em termos de resistência mecânica e custo.

Com base nos argumentos da conclusão, são sugeridos para estudos futuros:

- Ensaios de Envelhecimento Artificial Acelerado simulando diversos ciclos e ensaios de retenção dos IA após estes períodos, para analisar se haverá perda para o ambiente devido à exposição às intempéries;
- Realizar ensaios específicos para determinar propriedades como absorção sonora e condutividade térmica, para avaliar os desempenhos acústico e térmico dos painéis, principalmente dos painéis de densidade abaixo de 700g/cm^3 ;
- Avaliação do desempenho dos painéis de alta densidade quando aplicados em pisos.
- Usar a composição de adesivos para outras espécies de madeira.
- Utilizar outros adesivos em novas composições, visando melhorar o desempenho dos painéis no que se refere à absorção de água e inchamento em espessura.
- Avaliar o potencial de utilização dos painéis para ambientes externos, por intermédio de ensaios de envelhecimento natural e acelerado.
- Avaliar o potencial da composição de adesivos na produção de painéis de fibras, tipo MDF.
- Avaliar o desempenho dos painéis quando submetidos a ensaios com carregamentos cíclicos, para confirmar seu potencial de aplicação em produtos sujeitos a tal tipo de solicitação.

REFERÊNCIAS

ABE, H.; DOI, Y. Molecular and material design of biodegradable poly(hydroxyalkanoates). **Biopolymers**, Germany, v.3b, p. 105–132, 2002.

AGROFARTURA. (2012). **Teca Quer Ser a Vedete das Florestas Mundiais « Agro Indústria Fartura**. Disponível em: <<http://agrofartura.wordpress.com/2010/07/15/teca-quer-ser-a-vedete-das-florestas-mundiais/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

AGROMAFRA. **Reflorestamento de Pinus**. Disponível em: <<http://www.agromafra.com.br/reflorestamento.html>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

ALBUQUERQUE, C. E. C. Interações de variáveis no ciclo de prensagem de aglomerados. 175f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

ALMEIDA, N. C. **Propriedades Mecânicas e Térmicas do Sistema Epóxi DGEBA/ETILENODIAMINA Modificado com Nanoplateformas de Silsesquioxano Substituídas com grupo Ésteres**. 96f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE – ANSI. **A208.1: Particleboard**. Gaithersburg, 2009.

ASHORI, A. et al. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. **Industrial Crops and Products**, v. 2, n. 8, p. 225–230, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA. **Nossos produtos**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/produtosMDP.php>>. Acesso em: 17 nov. 2010.

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

_____. **NBR 14810: Chapas de madeira aglomerada**. Rio de Janeiro, 2013.

ATAR, I. et al. Effects of hardener type, urea usage and conditioning period on the quality properties of particleboard. **Materials and Design**, v. 56, p. 91–96, 2014.

BATTISTELLE, R. A. G. Physical and Mechanical Characterization of Sugarcane Bagasse Particleboards for Civil Construction. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 4, p. 408-417, 2016.

BELINI, U. L. et al. Formaldeído livre em painéis de eucalipto e cana-de-açúcar. **Ciência da Madeira**, v. 6, p. 94-99, 2015.

BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de Pinus sp tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona**. 129f. Dissertação (Mestrado) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

_____. **Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas**. 2014. 256 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BIASI, C. P.; ROCHA, M. P. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Floresta**, v. 37, p. 95-108, 2007.

BORTOLETTO JR. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Pinus merkusii. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 237-243, 2008.

BOWYER, J.L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J.G. Forest products and wood science: an introduction. Ames: Iowa State Press, 2003. 554p.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 20 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Planalto, Brasília ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 02 jan. 2016.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS**/Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF. IPEA, 2011.

CALEGARI, L. et al. Monitoramento da temperatura no interior de chapas aglomeradas durante o processo de prensagem. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 157-166, 2005.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CANEVAROLO JR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. **Propriedades físico-mecânicas de MDF a partir de fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos**. 113f. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, EESC/ IFSC/IQSC, USP, São Carlos.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS – CIFLORESTAS. **Pinus**. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=pinus>>. Acesso em: 06 set 2016.

CETEP. **Pintura eletrostática**. Disponível em: <http://www.cetecindustrial.com.br/equipamentos_para_pintura/pintura_eletrostatica.php>. Acesso em: 15 de Set. 2016.

CETRON. **Moveis para escritório**. Disponível em: <<http://www.cetron.com.br/moveis-arvy--acerto.html>>. Acesso em: 15 de Ago. 2016.

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

CHRISTOFORO, A. L. et al. Produção de chapas de partículas com resíduos de madeira *Cordia goeldiana*. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.2, p.368-377, 2015.

CPA. (2012). COMPOSITE PANEL ASSOCIATION. **PARTICLEBOARD**. Disponível em: <<http://www.pbmdf.com/Particleboard>>. Acesso em: 20 de set. 2011.

DACOSTA, L. P. et al. Propriedades físicas de chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos de processamento mecânico da madeira de *Pinus elliotii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 421-429, 2005.

DELLANNO. **MDP**. Disponível em: <<http://www.dellanno.com.br/blog/mdf-ou-mdp-qual-e-o-melhor/>>. Acesso em: 15 de Ago. 2016.

DIAS, N. A. B. et al. **Aproveitamento de resíduos de *Pinus sp* para a produção de chapas de partículas utilizando resina poliuretana bi-componente à base de óleo de mamona**. São Carlos: LaMEM, SET, EESC, USP, 2008.12p.

ECKELMAN, C. A. Brief survey of wood adhesives. **Forestry & Natural Resources**, Report, v.154, p.10, 1997.

EINSFELD, R. A. et al. Manufatura e características das chapas OSB. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1998, Florianópolis. **Anais...** Santa Catarina: UFSC, 1998. 387p.

ELBADAWI, M. et al. Mechanical and physical properties of particleboards made from Ailanthus wood and UF resin fortified by Acacias tannins blend. **J. Mater. Environ. Sci.**, v. 6, n.4, p. 1016-1021, 2015.

EMBRAPA. **Espécies de Pinus mais plantadas no Brasil**. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivodoPinus/03_especies_mais_plantadas_no_brasil.htm>. Acesso em: 15 de Nov. 2012.

EPF. (2011a). **O painel derivado de madeira mais versátil dos nossos dias**. Disponível em: <<http://www.osb-info.org/index.php?lang=nl>>. Acesso em: 16 de set. 2011.

_____. (2011b). **Informação técnica**. Disponível em: <http://www.osb-info.org/Assets/file/PO/OSB_Technical_Information_.pdf>. Acesso em: 16 de set. 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2006). **EN 300: Oriented Strand Boards (OSB) - Definitions, classification and specifications**. Portugal.

FERRO, F. S. **Painéis OSB com madeira Schizolobium amazonicum e resina poliuretana à base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção**. 101f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

FERRO, F. S. et al. Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) com Schizolobium amazonicum e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, p. 313-320, 2015.

FIORELLI, J. et. al. Sugarcane bagasse and castor oil polyurethane adhesive-based particulate composite. **Materials Research**, São Carlos, p. 01-08, 2013.

FONSECA, C. C. **Produção e utilização do biopolímero poli(hidroxibutirato) (PHB) em embalagens alimentícias**. 64f. Monografia (Graduação) - Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

FOREST PRODUCTS. **Annual Market Review 2013-2014**. Geneva, p. 156, 2014.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: Wood as an engineering material. General Technical Report 190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

FOREST PRODUCTS STATISTICS. **2014 Global Forest Products Facts and Figures**. Geneva, p.16, 2015.

GARCÍA, P. J. et al. Internal temperature and pressure responses to flake alignment during hot-pressing. **Holz als Roh und Werkstoff**, Berlin, v. 59, n. 4, p. 272-275, 2001

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

GHAFFAR, A. M. E. A. **Development of a biodegradable material based on poly (3-hidroxibutyrate) PHB**. PhD. (Thesis), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Germany, 2002.

GUIA TECNICO. **Tintas e vernizes** - Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao_limpa/documentos/tintas.pdf>. Acesso em: 10 de Nov. 2012.

HASELIEN, C. R. **Análise de parâmetros para a fabricação de chapas de partículas de madeira aglomeradas de madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex-maiden) e embaúba (*Cecropia* sp.)**. 75f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1989.

HOLD, T. V. et al. A stand of trees does not a forest make: Tree plantations and forest transitions. **Land Use Policy**, v. 56, p. 147-157, 2016.

IPT. Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo: **Fichas de Características das Madeiras Brasileiras**. ed. 2. n. 1791, p. 418, 1989.

IPT. Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo: **Informações sobre madeiras - Teca**. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/78.htm>. Acesso em: 04 fev. 2016.

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

_____. **Painéis de Madeira: características tecnológicas e aplicações.** Revista da madeira. Edição especial, 2003.

_____. **Painéis de madeira reconstituída.** Curitiba: FUPEF. Cap. 4, p.123-160, 2005.

IWAKIRI, S. et al. Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, 2008.

KATSUKAKE, A. **Uma revisão sobre resina Uréia-Formaldeído (R-UF) empregada na produção de Painéis de Madeira Reconstituída.** 61f. Monografia (Graduação) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2009.

KELLY, M.W. **A critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards.** U.S. For. Prod. Lab. General Technical Report FPL-10, Madison, 1977, 66p.

KOLLMANN, F. et al. Principles of wood science and technology. **Spirnger-Verlag**, Berlin, v. 2, p.154-283, 1975.

LAPO, L. E. R.; BERALDO, A. L. Avaliação de características de chapas de partículas de bambu e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. In. XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2008. Londrina, PR. **Anais.** CD-Room.

LIANG, W.; LV, M.; YANG, X. The combined effects of temperature and humidity on initial emittable formaldehyde concentration of a medium-density Fiberboard. **Building and Environment**, v. 98, p. 80-88, 2016a.

LIANG, W.; LV, M.; YANG, X. The effect of humidity on formaldehyde emission parameters of a medium-density fiberboard: Experimental bservations and correlations. **Building and Environment**, v. 101, p.110-115, 2016b.

LIMA, A. C. B. et. al. Custos para mitigação das emissões de CO₂ do setor de transporte da Paraíba via reflorestamentos. **Nativa**, v. 03, n. 04, p. 258-262, 2015.

LIU, Y.; ZHU, X. Measurement of formaldehyde and VOCs emissions from wood-based panels with nanomaterial-added melamine-impregnated paper. **Construction and Building Materials**, v. 66, p.132-137, 2014.

LPBRASIL. (2011a). **Processo de fabricação**. Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/osb/processo-de-fabricacao.asp>>. Acesso em: 15 de set. 2011.

_____. (2011b). Aplicações. Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/aplicacoes/Index.asp>>. Acesso em: 15 de set. 2011.

MACHADO, M. L. C. **Estudo das propriedades mecânicas e térmicas do polímeros biodegradável poli-3-hidroxibutirato (PHB) e de compósitos PHB/pó de madeira**. 134f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MACHADO, M. L. C. et al. Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas do Polímero Poli-3-Hidroxibutirato (PHB) e de Compósitos PHB/Pó de Madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 1, p. 65-71, 2010.

MALONEY, T. M. **Modern Particleboard & Dry Process Fiberboard manufacturing**. San Francisco: M Freeman, 672p, 1977.

_____. **Modern particleboard e dry-process fiberboard manufacturing**. 2 ed. São Francisco: M. Freeman , 1993. 689p.

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

MENDES, L. M. et al. Influência da densidade do painel e da composição em camadas nas propriedades físico-mecânicas de painéis OSB de clones de *Eucalyptus spp*. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 4, p. 379-385, 2008.

MENDES, R. F. et al. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, 2010.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 116f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MOSLEMI, A. A. (1974). Particleboard. **Materials**. London: Southern Illinois University Press, 244p.

MURARA JUNIOR, M. I; ROCHA, M. P.; TRUGINHA, P. F. Estimativa do Rendimento em Madeira Serrada de Pinus para Duas Metodologias de Desdobro. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 20, n.4, p.556-563, 2013.

NASCIMENTO, D. A. et. al. Expert system for identification of economically important insect pests in commercial teak plantations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 368-373, 2016.

NASCIMENTO, M. F. **Madeiras do agreste para uso em habitação**. 117f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

_____. **CHP: chapas de partículas homogêneas - madeiras do Nordeste do Brasil**. 143f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

_____. (2011). **Chapas OSB com uso de madeira nativa**. Disponível em: <http://www.remade.com.br/revistada_madeira_materia.php?num=1511&subject=Pain%E9isOSB&title=Chapas%20de%20OSB%20com%20uso%20de%20madeiras%20nativas>. Acesso em: 16 de set. 2011.

NASCIMENTO, M. F. et al. **Chapas de OSB com uso de madeiras nativas**. **REVISTA DA MADEIRA**. Disponível em: <http://www.remade.com.br/revistada_madeira_materia.php?num=1511&subject=Pain%E9isOSB&title=Chapas%20de%20OSB%20com%20uso%20de%20madeiras%20nativas>. Acesso em: 16 de fev. 2012.

PEREIRA, L.; ALVES, J. S.; REIS, K. C.; PEREIRA, J. Obtenção e caracterização de compósitos biodegradáveis de PHB e resíduos do beneficiamento de café. In: 10^o CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2009. Foz do Iguaçu. **Anais...** São Carlos: Cubo Multimídia, 2009. 204 p.

PINTO, M. L. **Propriedades e características da madeira de teca (tectona grandis) em função da idade**. 2007. 131p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2007.

PINTO, M. P. **Avaliação de sistemas de pultrudados com diferentes tipos de matrizes para aplicação em cabos condutores**. 88f. Monografia (Graduação) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

POLETO, S. F. S. **Protótipo arquitetônico utilizando painéis com inovação tecnológica fabricados com partículas homogêneas de resíduos de madeira**. 142f. Dissertação

(Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

QUENTAL, A. C. et al. Blendas de PHB e seus copolímeros: miscibilidade e compatibilidade. **Quim. Nova**, v. 33, n. 2, p.438-446, 2010.

REDDY, C. S. K. et al. Polyhydroxyalkanoates: an overview. **Bioresour Technol**, v.87, p.137–146, 2012.

REFLORA BRASIL. **Por que investir no plantio de Teca com a Reflora?**. Disponível em: <http://www.reflorabrasil.com/#!teca/c10p2>>. Acesso em: 15 de jul. 2016.

REVISTA FAPESP. **Útil, sem poluir**, 2012. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/08/22/%C3%9Atil-sem-poluir/>>. Acesso em: 15 de Set. 2016.

REVISTA MADEIRA. **Sistema de produção de teca no Brasil**, 2013. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1692&subject=E%20mais&title=Sistema%20de%20produ%E7%E3o%20de%20teca%20%20no%20Brasil>. Acesso em: 06 set 2016.

ROCCO LAHR, F, A. (2008). **Apresentação**. In: _____.(Org.). Produtos derivados da Madeira. São Carlos: EESC-USP.

SATKOWSKI, M. et al. Physical and processing properties of polyhydroxyalkanoate copolymers. **Biopolymers**, Germany, v.3b, p 231–263, 2002.

SBA - STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION. **Oriented Strand Board And waferboard**. TECHNICAL BULLETIN. Disponível em: <<http://osbguide.tecotested.com/pdfs/en/tb103.pdf>>. Acesso em: 18 de set. 2011.

SILAEX. **Epóxi**. Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/epoxi.htm>>. Acesso em: Acesso em: 15 de Nov. 2012.

SILVA, L. F. et al. Produção biotecnológica de poli-hidroxialcanoatos para a geração de polímeros biodegradáveis no Brasil. **Quim. Nova**, v. 30, n. 7, p.1732-1743, 2007.

SILVA, G. A. et al. Efeito de algumas variáveis de processamento nas propriedades físicas de painéis de madeira de partículas alongadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 51-60, 2006.

SORATTO, D. N. et al. Efeitos da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis mdp produzidos com *Eucalyptus* sp . **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, Pelotas, v. 04, n. 01, p. 46-59, 2012.

SOUZA, A. M. **Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas orientadas (OSB) de *Pinus* sp com inclusão de telas metálicas**. 116f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SOUZA, A. M. et al. Determination of OSB Wood Composites with Resin Derived from a Renewable Natural Resource. **Advanced Materials Research**, v. 1025-1026, p.693-696, 2014.

TINTAPO. **Pintura eletrostática com tinta em pó**. Disponível em: <<http://tintapo.com.br/noticias/1/pintura-eletrostatica-a-po/pintura-eletrostatica-com-tinta-em-po>>. Acesso em: 15 de Set. 2016.

VALARELLI, I. D. et al. Characterization of Medium Density Particleboards Using Agricultural Residues. **Advanced Materials Research**, Switzerland, v. 1088, p. 656-659, 2015.

VARANDA, L. D. **Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas de *Eucalyptus grandis* confeccionados com adição de casca de aveia**. 2012. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

_____. **Painéis de alta densidade para aplicação em pisos: produção e avaliação de desempenho**. 2016. 169 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

VASCONCELOS, Y. **Plástico de açúcar**, 2002. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2002/10/01/plastico-de-acucar/>>. Acesso em: 15 de Set. 2016.

VIDAL, A. C.; HORA, A. B. Panorama de mercado - painéis de madeira. **Produtos Florestais**, BNDES Setorial 40, p. 323-384, 2014.

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.

WEG. Pinturas Industriais em Pó. **Informações Técnicas DTC-13**, Guaramirim: WEG, 2008.

_____. (1989). Estudy of oriented structural board made from hybrid poplar.

WPIF. (2011). **Wood Panel Industries Federation**. Disponível em: <http://www.wpif.org.uk/uploads/PanelGuide/03_%20Section%201%20TRADA%20V3%2021_04.pdf>. Acesso em: 16 de set. 2011.

ZHENG, Y. et al. Properties of medium-density particleboard from saline Athel wood. **Industrial Crops and Products**, v. 23, p. 318–326, 2006.

ZHOW, D. A. (1990). Estudy of oriented structural board made from hybrid poplar. Physical and mechanical properties of OSB. **Holz Als Roh Und Werkstoff**, Berlin, v. 48, n. 7-8, p.293-296.

APÊNDICES

As Tabelas 21 e 22 apresentam os valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados segundo os 45 tratamentos delineados do planejamento fatorial completo, e a Tabela 23 expressa os menores ($Cv_{\min}$) e os maiores ($Cv_{\max}$) valores dos coeficientes de variação (Cv) por propriedade avaliada.

Tabela 22 - Valores médios das propriedades físicas dos painéis fabricados.

Tr	ρ (kg/cm ³)	IE2h (%)	IE24h (%)	Ab2h (%)	Ab24h (%)
1	0.62	10.18	12.71	79.08	99.91
2	0.55	8.66	11.38	72.37	110.00
3	0.63	5.13	8.24	32.28	75.97
4	0.58	4.47	8.95	29.12	83.85
5	0.57	3.79	6.99	19.15	56.93
6	0.59	7.19	10.51	47.21	82.98
7	0.61	5.41	9.55	31.65	75.28
8	0.64	4.94	9.26	22.10	59.35
9	0.66	3.95	7.35	13.77	40.91
10	0.62	3.92	7.45	12.98	39.75
11	0.62	4.67	7.31	30.10	67.94
12	0.64	3.54	6.46	18.08	49.32
13	0.62	2.99	5.57	13.95	40.06
14	0.66	4.35	5.12	12.45	37.05
15	0.67	4.89	7.09	10.50	32.54
16	0.70	4.80	11.12	17.41	40.51
17	0.66	6.90	12.41	37.97	68.36
18	0.69	4.42	10.44	21.89	60.26
19	0.79	3.13	10.06	10.76	31.42
20	0.79	2.16	6.15	7.92	25.83
21	0.76	4.07	10.46	24.27	51.32
22	0.73	3.26	8.41	15.01	40.62
23	0.76	1.91	6.60	11.81	34.65

continua

continuação

Tr	ρ (kg/cm ³)	IE2h (%)	IE24h (%)	Ab2h (%)	Ab24h (%)
24	0.76	1.93	6.23	11.56	29.54
25	0.76	1.97	5.63	9.43	29.91
26	0.74	1.69	6.11	9.55	31.41
27	0.73	1.56	5.89	9.21	19.23
28	0.81	1.71	5.06	6.10	22.60
29	0.74	1.80	4.41	10.90	28.83
30	0.73	1.99	6.49	9.67	25.60
31	0.77	6.85	14.46	23.64	57.36
32	0.85	3.23	11.72	10.98	35.33
33	0.89	2.71	10.69	7.40	22.09
34	0.86	2.82	9.68	5.83	20.26
35	0.84	3.67	10.20	6.35	21.69
36	0.87	3.04	8.79	7.36	26.22
37	0.82	3.02	9.81	8.69	32.23
38	0.84	2.35	9.14	6.87	24.23
39	0.87	2.45	8.71	5.57	18.73
40	0.85	2.60	6.97	5.13	18.79
41	0.86	2.19	6.80	9.84	7.22
42	0.85	2.55	6.05	9.66	6.86
43	0.85	2.60	6.17	5.87	18.43
44	0.83	2.41	6.01	5.95	19.65
45	0.86	1.84	4.24	4.17	15.32

onde: IE2h = inchamento em espessura após 2 horas; IE24h = inchamento em espessura após 24 horas; Ab2h = absorção de água após 2 horas; Ab24h = absorção de água após 24 horas; ρ = densidade

Fonte: Autoria própria

Tabela 23 - Valores médios das propriedades mecânicas dos painéis fabricados.

Tr	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	RAPt(N)	RAPf (N)
1	776	4.00	0.25	21.75	266.67
2	1056	5.93	0.39	22.20	266.67
3	1259	5.57	0.42	17.96	533.33
4	1371	6.95	0.75	18.85	483.33
5	1240	6.24	0.86	23.27	633.33
6	745	2.96	0.33	21.36	550.00
7	958	5.39	0.29	19.18	183.33
8	1344	8.30	0.59	22.88	516.67
9	1454	8.70	0.71	19.82	450.00
10	1802	10.40	1.05	19.50	416.67
11	1219	6.87	0.30	17.50	166.67
12	1340	6.58	0.31	19.30	266.67
13	1601	9.10	0.60	416.67	450.00
14	1347	6.07	0.92	783.33	683.33
15	1850	11.22	0.94	1100.00	683.33
16	2672	11.64	0.69	866.67	533.33
17	2170	7.25	0.67	933.33	633.33
18	2028	7.44	0.73	1116.67	1100.00
19	4044	19.02	0.92	1108.23	700.00
20	3664	18.77	1.17	1316.67	1416.67
21	3004	13.85	0.42	683.33	466.67
22	3716	17.80	0.85	900.00	816.67
23	3709	19.66	1.11	1086.67	1250.00
24	3413	21.59	1.26	933.33	533.33
25	4416	29.28	2.16	1666.67	1316.67
26	2834	14.54	0.97	1000.00	1150.00
27	3090	16.69	1.04	833.33	1033.33
28	3837	21.16	1.42	1050.00	1000.00
29	3102	21.36	1.47	1700.00	950.00
30	3057	17.88	0.96	1733.33	966.67

continua

continuação

Tr	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	RAPt(N)	RAPf (N)
31	3568	15.52	0.50	716.67	1083.33
32	4588	22.26	1.12	1666.67	1483.33
33	4403	19.16	1.00	1550.00	1700.00
34	4587	19.99	1.41	2050.00	1683.33
35	4113	18.06	1.66	1750.00	1666.67
36	3179	16.48	0.85	1216.67	1566.67
37	4334	21.18	0.58	1166.67	1633.33
38	4061	19.15	1.63	1600.00	1583.33
39	3940	22.20	1.66	2083.33	1616.67
40	3710	19.95	1.66	1866.67	1783.33
41	5013	24.18	1.44	1450.00	1400.00
42	4070	22.60	2.12	1450.00	1650.00
43	4235	25.08	1.96	1633.33	1650.00
44	3750	20.87	1.29	1366.67	1883.33
45	3680	20.56	1.95	2283.33	1833.33

Onde: TP = resistência à tração perpendicular; MOR = módulo de resistência na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; RAPf = resistência ao arrancamento de parafuso para face e RAPt = resistência ao arrancamento de parafuso para topo.

Fonte: Autoria própria

Tabela 24 - Menores e maiores valores do coeficientes de variação (Cv) para as propriedades físicas e mecânicas considerando os 45 tratamentos delineados.

Cv (%)	ρ (kg/cm³)	IE2h (%)	IE24h (%)	Ab2h (%)	Ab24h (%)
Cv _{min}	3,56%	7,09%	8,87%	3,96%	12,33%
Cv _{max}	13,22%	36,98%	42,43%	40,14%	50,28%
Cv (%)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	RAPt (N)	RAPf (N)
Cv _{min}	5,62%	12,23%	9,22%	7,93%	4,23%
Cv _{max}	29,05%	36,43%	33,77%	68,24%	56,72

onde: IE2h = inchamento em espessura após 2 horas; IE24h = inchamento em espessura após 24 horas; Ab2h = absorção de água após 2 horas; Ab24h = absorção de água após 24 horas; ρ = densidade. TP = resistência à tração perpendicular; MOR = módulo de resistência na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; RAPf = resistência ao arrancamento de parafuso para face e RAPt = resistência ao arrancamento de parafuso para topo.