UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUCIANO DONIZETI VARANDA

Painéis de alta densidade para aplicação em pisos: produção e avaliação de desempenho

São Carlos
2016

LUCIANO DONIZETI VARANDA

Painéis de alta densidade para aplicação em pisos: produção e avaliação de desempenho

Versão Corrigida

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 DESTE TRABALHO, 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.

V288p

Varanda, Luciano Donizeti

Painéis de alta densidade para aplicação em pisos:
produção e avaliação de desempenho / Luciano Donizeti
Varanda; orientador Francisco Antonio 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. Painéis de partículas. 2. *Pinus elliottii*. 3. Casca
de aveia. 4. Pisos de madeira. 5. Propriedades físicas e
mecânicas. 6. Análise de variância (ANOVA). I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUCIANO DONIZETI VARANDA.**

Título da tese: "Painéis de alta densidade para aplicação em pisos: produção e avaliação de desempenho".

Data da defesa: 12/09/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

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

APROVADO

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

APROVADO

Profa. Dra. **Cristiane Inácio de Campos**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Itapeva)

APROVADO

Prof. Dr. **Juliano Fiorelli**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA-USP)

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**

Aos meus amados pais Gonçalo (*in memoriam*) e Vera, pelo incentivo,
Ao meu cordial mestre Francisco Antonio Rocco Lahr, pela confiança,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde, determinação e oportunidades concedidas;

Aos meus pais Gonçalo dos Santos Varanda (*in memoriam*) e Vera Lúcia Rosalin, por toda a motivação, carinho e aprendizado. Em especial a minha mãe Vera por toda participação e incentivo, além da amizade, bons conselhos e excepcionais momentos que vivemos juntos e que serão recordados por toda minha vida;

Aos meus avós Benedito Rosalin (*in memoriam*) e Lázara Cambi Rosalin (*Lazinha*) por toda motivação e pelos bons exemplos de honestidade, fé e humildade;

Ao meu fraterno orientador Prof. Titular Francisco Antonio Rocco Lahr, pela cabal participação neste trabalho e em minha formação profissional, constantemente acrescentando e transmitindo ensinamentos de presteza, competência e desenvolvimento;

Ao cordial Prof. Dr. André Luis Christoforo da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, pela contribuição técnica, seriedade, objetividade e amizade, sempre disposto a complementar;

A todos os professores e funcionários do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras – LaMEM/SET pela contribuição neste trabalho. Em especial ao técnico Aparecido Galindo (*Cidão*) pelo auxílio na execução deste trabalho e a pesquisadora Maria Fátima do Nascimento (*Fati*), pela contribuição neste estudo;

Aos amigos de estudos no LaMEM: Amós, Caio, Calil Neto, Decio, Diego, Diogo, Fabiane, Felipe, Julio, Laurenn, Leandro, Leonardo, Lorenzo, Márcio, Marcos, Maria Gorett, Marília, Raquel, Ricardo, Rodrigo, Sabrina e Tiago, pela contribuição;

Aos professores e funcionários do curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – EESC/USP. Em especial ao técnico acadêmico Victor Luiz Barioto, por toda

competência e contribuição e, ao técnico Douglas Giovanni Bom, pelo auxílio na execução dos ensaios de impacto Charpy;

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho, do Departamento de Engenharia de Produção da EESC/USP, por disponibilizar o rugosímetro, e ao técnico Geraldo José Mangerona Frigo, do Instituto de Física de São Carlos – IFSC, pela execução dos ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio;

As empresas que concederam os materiais para este estudo: resíduos de madeira de *Pinus elliottii*, casca de aveia (*Avena sativa*) e os adesivos poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos de doutorado e pelo apoio à pesquisa;

A Universidade de São Paulo - USP, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado, pela concessão de toda a infraestrutura de seus laboratórios e recursos necessários para a realização deste estudo e pela excelência em ensino, pesquisa e recursos humanos;

A todos os amigos e amigas da cidade de Dourado – SP, pela amizade, convivência e pelos contatos com a natureza exuberante da cidade, principalmente as idas as belas cachoeiras e aos rios Jacaré Pepira e Ribeirão do Bebedouro. Em especial ao geógrafo e professor Fernando Cesar Borim (*Fernandão*), ao engenheiro mecânico José Cezar Rosato Júnior (*Chicão*), ao historiador e empresário Luciano Sérgio Pietro (*Biju*), ao educador físico Ricardo Zólio (*Pilita*) e ao empresário Ronaldo Antonio Simões (*Rei*).

Ao engenheiro agrônomo Thiago João Costa (*Pirulito*) e a médica veterinária Juliana França dos Reis Costa (*Ju*), casal de amigos que tem grande participação em minha vida;

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram com a realização deste trabalho e desta etapa da minha vida;

... os meus sinceros agradecimentos!

Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

VARANDA, L. D. **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.

Temas relacionados ao desenvolvimento de novos materiais têm sido cada vez mais abordados e discutidos, num contexto em que questões como meio ambiente, sociedade, economia de energia e aproveitamento de resíduos, vêm se tornando relevantes. Neste cenário, faz-se necessário estudar aplicações de insumos alternativos na produção de pisos de madeira, tanto para reduzir o consumo de essências tropicais quanto para suprir o aumento da demanda de madeira nas indústrias deste segmento. O objetivo deste estudo foi produzir painéis de partículas homogêneos de alta densidade, com resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e casca de aveia (*Avena sativa*), aderidos sob pressão com dois tipos de adesivo, poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído, nos percentuais de 11 e 13%, e avaliar o desempenho físico-mecânico de tais painéis para aplicação em pisos. O desempenho físico-mecânico dos painéis (Planejamento I – 20 tratamentos) foi avaliado com base nas normas ABNT NBR 14810 (2006 e 2013). Realizou-se análise de variância (ANOVA) para testar a influência dos fatores individuais (percentual de casca de aveia, percentual de adesivo e tipo de adesivo), além das interações entre tais fatores (dois a dois e três a três) nas propriedades físico-mecânicas dos painéis. Também foi avaliado o desempenho para pisos, tanto dos painéis (Planejamento II – 12 tratamentos) quanto de três espécies de madeira tropical (Angelim Vermelho, *Dinizia excelsa*; Cumaru, *Dipteryx odorata* e Jatobá, *Hymenaea* sp.), segundo diversas normas relacionadas a pisos de madeira. Os resultados apontaram propriedades físico-mecânicas dos painéis, em alguns tratamentos superiores aos requisitos estipulados por normas nacionais e internacionais. Quanto ao desempenho para pisos, os painéis apresentaram desempenho semelhante as três espécies de madeira, na maioria das propriedades avaliadas. A análise de porosimetria por intrusão de mercúrio confirmou a similaridade entre os painéis (do Planejamento II) e as três espécies de madeira avaliadas, evidenciando a potencialidade dos painéis produzidos para aplicação na indústria de pisos engenheirados.

Palavras-chave: Painéis de partículas. *Pinus elliottii*. Casca de aveia. Pisos de madeira. Propriedades físicas e mecânicas. Análise de variância (ANOVA).

ABSTRACT

VARANDA, L. D. **High density panels for application in floors:** production and performance evaluation. 2016. 169 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Matters related to the development of new materials have been increasingly addressed and discussed in a context where issues such as the environment, society, energy and waste recovery economy, is becoming relevant. In this scenario, it is necessary to study alternative inputs for applications in the production of wood floors, both to reduce the consumption of tropical essences as to meet the increasing demand for wood in industries in this segment. The aim this study was to produce high density homogeneous particleboard with waste wood of *Pinus elliottii* and oat hulls (*Avena sativa*), adhered under pressure with two types of adhesive, castor oil-based polyurethane and melamine formaldehyde, the percentage of 11 and 13%, and evaluate the physical and mechanical performance of such panels for use in floors. The physical-mechanical performance of the panels (Planning I – 20 treatments) was evaluated based on the NBR 14810 (2006 and 2013) standards. We conducted an analysis of variance (ANOVA) to evaluate the influence of individual factors (oat hulls percentage, adhesive percentage and type of adhesive), and the interactions between these factors (two by two and three by three) on the physical properties -mechanical panels. It was also evaluated the performance for floors, both panels (Planning II – 12 treatments) as three species of tropical wood (Angelim Vermelho, *Dinizia excelsa*; Cumaru, *Dipteryx odorata* e Jatobá, *Hymenaea* sp.), according to various standards related to wood floors. The results indicated physical and mechanical properties of the panels, in some treatments superior to the requirements stipulated by national and international standards. As for performance flooring, panels statistically equivalent to the three species of wood, most of the evaluated properties. Porosimetry analysis by mercury intrusion confirmed the similarity between the panels (from Planning II) and the three wood species evaluated, demonstrating the potential of the panels produced for use in the flooring industry engineered.

Keywords: Particleboard. *Pinus elliottii*. Oat hulls. Wood floors. Physical and mechanical properties. Analysis of variance (ANOVA).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partículas de madeira de <i>Pinus elliottii</i> (a), partículas de casca de aveia (b), adesivo poliuretano à base de mamona (c) e adesivo melamina formaldeído (d). ..	56
Figura 2 - Equipamento SOLOTEST de vibração utilizado na análise granulométrica.	59
Figura 3 - Encoladeira utilizada (a) e misturador das partículas com o adesivo (b).	63
Figura 4 - Molde de pré-prensagem (a), molde com partículas e adesivo (b), pré-prensagem (c) e “colchão” de partículas pré-conformado (d).	64
Figura 5 - Prensa (a), painel sendo prensado (b) e painel após prensagem (c).	65
Figura 6 - Esquadrejamento (a), painéis esquadrejados (b) e parte dos corpos de prova de flexão (c).	66
Figura 7 - Esquema de retirada dos corpos de prova para o planejamento I. O desenho acima esta fora de escala com dimensões em milímetros.	67
Figura 8 - Ensaio para determinação da densidade dos painéis: balança analítica (a), paquímetro digital (b) e corpos de prova (c).	70
Figura 9 - Corpos de prova de inchamento em espessura e absorção de água.	72
Figura 10 - Ensaio de flexão estática (a) e ensaio de resistência à tração perpendicular (b). ..	74
Figura 11 - Furadeira de bancada (a), parafusadeira fixando o parafuso (b), ensaios de arrancamento de parafuso: face (c) e topo (d).	76
Figura 12 - Esquema de retirada dos corpos de prova dos painéis para o planejamento II. O desenho acima esta fora de escala com dimensões em milímetros.	79
Figura 13 - Plaina utilizada (a), desengrossadeira (b) e tábuas das madeiras após os processos de aplainamento e desengrosso (c).	82
Figura 14 - Esquema de retirada dos corpos de prova das madeiras tropicais para o planejamento II. O desenho acima esta fora de escala com dimensões em milímetros.	83
Figura 15 - Ensaio de abrasão.	85
Figura 16 - Corpo de prova para o ensaio de dureza (a) e ensaio de dureza Janka (b).	86
Figura 17 - Ensaio de impacto Charpy (a) e suporte de fixação do corpo de prova (b).	88
Figura 18 - Ensaio de rugosidade superficial.	89
Figura 19 - Corpo de prova (a), cápsula para intrusão do mercúrio (b) e equipamento Micromeritics Poresizer – 9320 (c).	91

Figura 20 - Gráficos de interação entre fatores para as propriedades físicas. Interação %CA x TA: no I 2h (a); no I 24h (b), na A 2h (c), na A 24h (d) e interação %CA x %Ades na A 2h (e).....	116
Figura 21 - Gráficos de interação entre fatores em relação as propriedades mecânicas: %CA x %Ades para o MOR (a); %CA x TA para o MOR (b) e %Ades x TA para a TP (c).....	117
Figura 22 - Gráfico de interação entre os três fatores para a resistência à abrasão (Ab).....	125
Figura 23 - Imagens de MEV - escala de 2 milímetros: tratamento 1 (a); tratamento 9 (b); escala de 200 microns: tratamento 1 (c) e tratamento 9 (d).	132
Figura 24 - Imagens de MEV - escala de 50 microns: tratamento 1 (a) e tratamento 9 (b)....	133
Figura 25 - Imagens de MEV - escala de 2 milímetros: tratamento 2 (a); tratamento 10 (b); escala de 200 microns: tratamento 2 (c) e tratamento 10 (d).....	134
Figura 26 - Imagens de MEV - escala de 50 microns: tratamento 2 (a) e tratamento 10 (b)..	135
Figura 27 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o I 2h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	158
Figura 28 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o I 24h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	159
Figura 29 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a A 2h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	159
Figura 30 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a A 24h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	160
Figura 31 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a D: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	160
Figura 32 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a RC: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	161
Figura 33 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o MOE: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	161
Figura 34 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o MOR: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	162
Figura 35 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a TP: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	162
Figura 36 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o APf: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.....	163
Figura 37 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o APT: normalidade (a),	

homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	163
Figura 38 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a resistência à abrasão (Ab): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	164
Figura 39 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a dureza Janka (DJ): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	165
Figura 40 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a energia absorvida no impacto (EAI): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	165
Figura 41 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a rugosidade superficial (Ra): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	166
Figura 42 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a resistência à abrasão (Ab): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	167
Figura 43 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a dureza Janka (DJ): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	168
Figura 44 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a energia absorvida no impacto (EAI): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	168
Figura 45 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a rugosidade superficial (Ra): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição da temperatura de prensagem do adesivo melamina formaldeído.	60
Tabela 2 - Parâmetros de produção e avaliação dos painéis preliminares.	61
Tabela 3 - Delineamento experimental adotado.	62
Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios do planejamento I.	68
Tabela 5 - Delineamento experimental do planejamento II.	78
Tabela 6 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios do planejamento II.	79
Tabela 7 - Classificação do piso quanto à resistência à abrasão.	84
Tabela 8 - Classificação do piso quanto ao nível de uso.	85
Tabela 9 - Amostras retiradas para análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.	90
Tabela 10 - Amostras retiradas para análise de microscopia eletrônica de varredura.	93
Tabela 11 - Teor de umidade das partículas de <i>Pinus elliottii</i> e casca de aveia.	97
Tabela 12 - Distribuição granulométrica das partículas de <i>Pinus elliottii</i>	99
Tabela 13 - Distribuição granulométrica das partículas de casca de aveia.	99
Tabela 14 - Resultados da etapa preliminar I.	100
Tabela 15 - Resultados das etapas preliminares II e III.	101
Tabela 16 - Teor de umidade dos painéis de partículas.	102
Tabela 17 - Resultados das propriedades físicas referente aos 20 tratamentos delineados. ...	104
Tabela 18 - Resultados das propriedades físicas referentes a outros estudos e aos requisitos normativos.	106
Tabela 19 - Resultados das propriedades mecânicas referente aos 20 tratamentos delineados.	108
Tabela 20 - Resultados das propriedades mecânicas referentes a outros estudos e aos requisitos normativos.	109
Tabela 21 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA referente ao planejamento I (20 tratamentos).	111
Tabela 22 - Resultados da ANOVA referentes ao planejamento I.	112
Tabela 23 - Resultados do teste de Tukey referente ao fator percentual de casca de aveia (variações nas frações de casca de aveia).	113
Tabela 24 - Resultados do teste de Tukey referentes ao planejamento I (fator percentual de adesivo e fator tipo de adesivo).	115

Tabela 25 - Resultados do teor de umidade e da densidade aparente das três espécies de madeira tropical.....	118
Tabela 26 - Resultados obtidos das propriedades avaliadas referentes ao planejamento II e as espécies de madeira.	119
Tabela 27 - Classes de rugosidade segundo a norma ABNT NBR 8404:1984.	122
Tabela 28 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA referentes ao planejamento II (12 tratamentos).	123
Tabela 29 - Resultados da ANOVA referentes ao planejamento II.	123
Tabela 30 - Resultados do teste de Tukey referente ao planejamento II (variações nas frações de casca de aveia).	124
Tabela 31 - Resultados do teste de Tukey referente ao planejamento II (variações dos teores de adesivo e dos tipos de adesivo).	124
Tabela 32 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA referentes à comparação dos 12 tratamentos do planejamento II com as três espécies de madeira.....	126
Tabela 33 - Resultados do teste de Tukey da comparação entre os doze tratamentos do planejamento II com as três espécies de madeira investigadas.....	127
Tabela 34 - Propriedades porosimétricas das amostras analisadas.	129

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	29
3.2 PAINÉIS DE PARTÍCULAS	30
3.2.1 Breve histórico de painéis de partículas	30
3.2.2 Definição de painéis de partículas	31
3.2.3 Panorama brasileiro de painéis aglomerados	33
3.2.4 Utilização de materiais alternativos em painéis aglomerados	34
3.3 MATÉRIAS-PRIMAS EMPREGADAS	36
3.3.1 Madeira de <i>Pinus</i>	36
3.3.2 Casca de aveia	37
3.3.3 Adesivos	38
3.3.3.1 Adesivo melamina formaldeído.....	40
3.3.3.2 Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	41
3.4 PARÂMETROS QUE AFETAM O DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS	42
3.5 PISOS DE MADEIRA.....	44
3.5.1 Painéis de alta densidade para pisos	45
3.5.2 Características do setor de pisos de madeira	47
3.5.3 Espécies de madeira tropical estudadas.....	50
3.5.3.1 Angelim Vermelho (<i>Dinizia excelsa</i>).....	50
3.5.3.2 Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i>).....	51
3.5.3.3 Jatobá (<i>Hymenaea</i> sp.).....	52
3.6 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	53

4 MATERIAL E MÉTODOS	55
4.1 MATERIAL.....	55
4.2.1 Produção e caracterização das partículas	57
4.2.1.1 Geração das partículas	57
4.2.1.2 Determinação das propriedades das partículas	58
4.2.1.2.1 Teor de umidade	58
4.2.1.2.2 Análise granulométrica	58
4.2.2 Estudos preliminares e delineamento experimental.....	59
4.2.3 Confeção dos painéis.....	62
4.2.3.1 Preparação e aplicação da resina.....	63
4.2.3.2 Pré-prensagem e prensagem.....	64
4.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA – PLANEJAMENTO I.....	65
4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS PAINÉIS	68
4.4.1 Propriedades físicas avaliadas.....	68
4.4.1.1 Teor de umidade	69
4.4.1.2 Densidade.....	69
4.4.1.3 Razão de compactação	70
4.4.1.4 Inchamento em espessura e absorção de água	71
4.4.2 Propriedades mecânicas avaliadas	72
4.4.2.1 Módulo de elasticidade e módulo de ruptura	72
4.4.2.2 Tração perpendicular.....	74
4.4.2.3 Arrancamento de parafuso	75
4.5 ENSAIOS PARA PISOS – PLANEJAMENTO II.....	76
4.5.1 Delineamento experimental - planejamento II.....	77
4.5.2 Obtenção dos corpos de prova – planejamento II	78
4.5.3 Determinação das propriedades das madeiras tropicais.....	80
4.5.3.1 Teor de umidade	80
4.5.3.2 Densidade.....	81
4.5.3.3 Confeção dos corpos de prova das madeiras tropicais	81
4.5.4 Propriedades para pisos.....	83
4.5.4.1 Abrasão.....	83
4.5.4.2 Dureza Janka	86
4.5.4.3 Impacto Charpy.....	87
4.5.4.4 Rugosidade superficial.....	88

4.5.5 Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	89
4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	92
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	94
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
5.1 PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS	97
5.1.1 Teor de umidade	97
5.1.2 Análise granulométrica	98
5.2 ESTUDOS PRELIMINARES	100
5.2.1 Etapa preliminar I.....	100
5.2.2 Etapas preliminares II e III	101
5.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PAINÉIS – PLANEJAMENTO I....	102
5.4 PROPRIEDADES PARA PISOS – PLANEJAMENTO II	118
5.5 ANÁLISE DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	128
5.6 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	130
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	137
REFERÊNCIAS	143
APÊNDICES	157

1 INTRODUÇÃO

Assuntos ligados ao estudo, desenvolvimento e caracterização de novos materiais vêm sendo constantemente abordados, no que diz respeito às necessidades impostas pelo mercado, como materiais mais eficientes, redução de custos com energia, maior versatilidade, redução na geração de resíduos, menores impactos ambientais e produtos menos impactantes ao planeta ao longo de seu ciclo de vida (SILVA et al., 2015).

A vantagem dos produtos derivados da madeira diz respeito ao aprimoramento das propriedades da madeira maciça, juntamente com a possibilidade de utilização de matérias-primas alternativas em sua fabricação. A utilização de produtos à base de madeira tem crescido muito nos últimos anos, no Brasil e no mundo, resultando num aproveitamento mais racional dessa matéria-prima. Os painéis de partículas merecem destaque no cenário dos produtos derivados da madeira, pois são a principal matéria-prima de uma gama de indústrias de outros setores madeireiros, como as de pisos, de móveis, de embalagens, indústria naval e de diversos segmentos da construção civil. A matéria-prima utilizada na produção de painéis aglomerados pode ser tanto de madeira oriunda de florestas plantadas quanto do reaproveitamento dos mais diversos tipos de resíduos florestais ou agroindustriais (DACOSTA, 2004), justamente pela estrutura lignocelulósica ser semelhante à da madeira (ROWELL; HAN; ROWELL, 2000).

Segundo Bidone (1999), com a intensificação das atividades industriais, o crescimento populacional e a expansão do consumo, aumentaram significativamente a quantidade e os tipos de resíduos gerados, causando impactos alarmantes ao meio ambiente. No Brasil, resíduos da agroindústria estão disponíveis em grande volume, apresentando significativo potencial de emprego.

Os resíduos sólidos provenientes da agroindústria quando associados à disposição inadequada, além de ocorrer perda de nutrientes e de biomassa, aumenta o potencial poluidor desses materiais. Portanto, utilizações mais adequadas, que agregam maior valor a estes resíduos, podem minimizar problemas ambientais, além de gerar empregos e renda.

Dentre esses resíduos agroindustriais, a casca gerada no processo de beneficiamento do cereal aveia apresenta grande potencial, especialmente em relação à quantidade de matéria-prima que, segundo Webster (1986), representa cerca de 30% da massa do referido cereal. De acordo com o que aponta o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015), a

produção brasileira de aveia foi de aproximadamente 370 mil toneladas em 2014, ou seja, foram geradas aproximadamente 111 mil toneladas de casca de aveia. Ainda segundo o IBGE (2015), as previsões da produção brasileira do cereal aveia para safra de 2016 é de 590 mil toneladas (177 mil toneladas de casca de aveia), valor 60% superior à safra 2014. O Estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor de aveia do país, sendo responsável por 77% da referida safra.

Na produção brasileira de pisos de madeira, a matéria-prima básica, tradicionalmente oriunda de florestas nativas, está sendo gradativamente substituída por painéis à base de madeira proveniente de florestas plantadas, como as espécies dos gêneros *Corymbia*, *Eucalyptus* e *Pinus*. Estas espécies apresentam, entre outras vantagens, rápido crescimento, alta produtividade, redução da idade de corte, segurança de abastecimento e menor heterogeneidade, além da possibilidade de minimizar o uso de espécies de madeira oriundas de florestas nativas (IWAKIRI et al., 2008).

A redução do desmatamento de florestas nativas traz uma série de benefícios ambientais, econômicos e sociais. Sabe-se que a agricultura (principalmente a soja) e a pecuária (especificamente a criação de bovinos de corte) são os grandes responsáveis pelo desmatamento da Amazônia. Mas as indústrias madeireiras, em especial as do setor de pisos de madeira maciça, também têm relevante participação neste processo de extinção da floresta nativa. E para agravar ainda mais os fatos, de acordo com Andrade (2011), o aproveitamento médio da maioria das indústrias de pisos de madeira tropical é na faixa de 51 a 60%. Isso reflete a precariedade das indústrias do setor, com processos pouco eficientes e a necessidade de melhorias em equipamentos e qualificação de mão de obra para otimizar a produção e torná-la mais eficiente. Em 2010, a produção brasileira de pisos de madeira superou os 25 milhões de metros quadrados, sendo que destes, cerca de 12 milhões de metros quadrados se referem a pisos de madeira maciça (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE PISOS DE MADEIRA - ANPM, 2015).

Neste contexto, faz-se necessário e urgente o estudo de insumos alternativos na produção de pisos de madeira. Dentre os benefícios, destacam-se tanto a redução do consumo de madeiras de espécies tropicais, quanto a possibilidade de suprir o aumento da demanda de matéria-prima das indústrias do segmento, forçando a busca por outros materiais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo foi produzir painéis de partículas homogêneos de alta densidade, com resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e casca de aveia (*Avena sativa*), aderidos sob pressão com dois tipos de adesivo, poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído, e avaliar o desempenho para aplicação em pisos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- verificar a viabilidade do emprego dos adesivos (poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído) e sua compatibilidade com os insumos empregados na produção dos painéis em questão;

- verificar a viabilidade da utilização de materiais alternativos na produção de painéis de alta densidade, com partículas de *Pinus elliottii* (madeira de reflorestamento e resíduo de madeira utilizada para resinagem), casca de aveia (resíduo agroindustrial) e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (de procedência natural e renovável);

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

3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

O desenvolvimento tecnológico proporcionou ao homem criar e produzir equipamentos e máquinas cada vez mais sofisticados e que melhor satisfaçam às necessidades humanas. Junto a este avanço tecnológico, surge a necessidade de materiais que atendem satisfatoriamente estas novas exigências da engenharia. De acordo com Faria (2007), a matéria-prima tradicionalmente empregada (materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos) ainda possui grande aplicabilidade, porém, vem sendo continuamente substituída por materiais compósitos.

Segundo aponta Callister Jr (2006), os materiais compósitos podem combinar propriedades incomuns, que não podem ser individualmente atendidas com as tradicionais ligas metálicas, materiais poliméricos e cerâmicos existentes. Um material compósito é formado pela mistura ou pela combinação de dois ou mais microconstituintes ou macroconstituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros.

Muitos materiais compósitos são formados apenas por duas fases. A primeira é chamada matriz (contínua) e envolve a outra fase. A esta segunda chama-se frequentemente fase dispersa (reforço). No que se refere à fase matriz, o compósito pode ser classificado em três grupos: metálico, cerâmico e polimérico. Em relação à fase dispersa, pode ser classificado em três categorias: particulados, fibras contínuas e fibras descontínuas. Os materiais compósitos podem ser de procedência natural, como madeira, osso, dente e músculo ou de procedência não natural (ou sintética), que se subdividem em compósitos de origem metálica, polimérica ou cerâmica (CALLISTER JR, 2002).

A madeira, por sua vez, pode ser combinada com diversos outros materiais, como madeira e adesivo, madeira e cimento, madeira e plástico, além de poder ser combinada com outras fibras ou partículas de procedência lignocelulósica (DACOSTA, 2004; DIAS, 2008; IWAKIRI, 2005; ROWELL; HAN; ROWELL, 2000).

Segundo Iwakiri e Prata (2008), os painéis de madeira e cimento são tipos especiais de painéis aglomerados, constituídos basicamente de partículas de madeira com um aglutinante

de origem mineral, em que o cimento é o produto mais empregado na sua produção. Nos painéis de madeira e cimento, o cimento substitui a resina termofixa do tipo ureia formaldeído, cujo processo de endurecimento é decorrente de reações exotérmicas da hidratação do cimento na presença de água.

Para Okamoto (2003), compósitos de madeira e plástico contribuem tanto para a reciclagem de resíduos de madeira e de plástico quanto dão base para o desenvolvimento de novos tipos de materiais à base de madeira.

Os compósitos de madeira podem apresentar propriedades mais convenientes do que a madeira de origem, pois, como ocorre nos painéis de madeira, a matéria-prima utilizada é de boa qualidade e com menor número de defeitos (DIAS, 2008).

3.2 PAINÉIS DE PARTÍCULAS

3.2.1 Breve histórico de painéis de partículas

Os painéis de madeira aglomerada (hoje painéis de partículas) surgiram na Alemanha no início da década de 1940, como forma de viabilizar a utilização de resíduos de madeira devido à dificuldade de obtenção de madeiras de boa qualidade para produção de painéis compensados, em virtude do isolamento da Alemanha durante a segunda guerra mundial (IWAKIRI, 2005).

Logo a seguir, foi interrompida a produção de aglomerados, justamente pela redução da disponibilidade de matéria-prima para fabricação de resina, sabendo da prioridade do uso de petróleo para fins militares. Após a segunda guerra, segundo Iwakiri (2005), foi retomado nos Estados Unidos o processo de produção e desenvolvimento de painéis aglomerados, com aperfeiçoamento de equipamentos e processos. A partir da década de 1960, ocorreu grande expansão das instalações industriais e avanço tecnológico e, em meados da década de 1970, iniciou-se o processo de desenvolvimento de painéis estruturais dos tipos “waferboard” e “oriented strand board - OSB”.

No Brasil, registros da história da produção de painéis aglomerados são divergentes. Segundo Silva (2004), a primeira indústria se instalou em Curitiba, estado do Paraná, e começou a produzir em 1966, época em que outras indústrias se instalaram nas regiões Sul e

Sudeste do país. Já Carnos (1988) afirma que os painéis de madeira aglomerada começaram a ser produzidos no Brasil em 1965, nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul. Em sua dissertação, Barros Filho (2009) descreve detalhadamente todo o histórico da produção de painéis de madeira aglomerada mundial e, especificamente, no Brasil.

3.2.2 Definição de painéis de partículas

Há várias definições para painéis aglomerados ou painéis de partículas de madeira. Iwakiri (2005) define painel de madeira aglomerada ou, comercialmente “aglomerado”, como um painel produzido com partículas de madeira, com a incorporação de um adesivo sintético, reconstituídos numa matriz randômica e consolidados por meio da aplicação de calor e pressão por meio de uma prensa. Outros materiais lignocelulósicos também podem ser utilizados na fabricação de aglomerados.

O aglomerado é produzido a partir do processo de picagem da madeira (ou outro insumo lignocelulósico) em partículas pequenas que recebem a aplicação de um adesivo. Esta mistura de partículas e adesivo (chamada colchão de partículas) é consolidada na prensa por intermédio de calor e pressão, seguindo para o acondicionamento, onde o painel permanece por certo tempo para estabilização com o ambiente (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Os painéis aglomerados caracterizam-se pela conversão da madeira em partículas, que após secas e misturadas a um adesivo sintético termofixo e distribuídas aleatoriamente entre si (matriz randômica), são conformadas a partir dos efeitos de temperatura e pressão, gerando um painel (MOSLEMI, 1974; PEDRESCHI, 2009; TSOUMIS, 1991).

A primeira norma técnica brasileira foi a ABNT NBR 14810, adotada em 2002 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e que define painel ou chapa de aglomerado como sendo “um produto na forma de painel, com espessura variando de 3 a 50 milímetros, constituído por partículas de madeira aglutinadas com resina sintética ou natural, termofixas, sob ação do calor e pressão. Os tipos de adesivos, a geometria das partículas, a densidade do painel, bem como o processo de produção podem ser modificados para produção de painéis adequados a cada aplicação ou finalidade. Durante a fabricação dos painéis, podem ser acrescentados aditivos que proporcionam painéis com características especiais” (ABNT,

2002).

Até a edição da norma brasileira, em 2002, os painéis de madeira aglomerada eram abordados de acordo com normas internacionais. A American Society for Testing and Materials – ASTM D-1037 define aglomerado como “um produto composto de pedaços miúdos de madeira ou outros materiais lignocelulósicos que são unidos por adesivos sintéticos em presença de calor e pressão” (BARROS FILHO, 2009; BERNARDI, 2006). Segundo Barros Filho (2009), normas técnicas de outros países como as da Deutsches Institut für Normung (DIN), Alemanha, e da British Standard Institute (BSI), Inglaterra, definem painéis de madeira aglomerada de forma análoga às descritas anteriormente.

De acordo com Campos e Lahr (2004), a fabricação de produtos derivados da madeira, principalmente os painéis à base de madeira, tem se tornado uma alternativa interessante no âmbito dos materiais disponíveis para aplicações na construção civil, nas indústrias moveleira e naval, entre outras. Desta forma, a produção de painéis à base de madeira é relevante para o setor florestal brasileiro e, conseqüentemente, para a economia brasileira, justamente por ser responsável pela geração de um considerável número de empregos diretos e indiretos. Porém, fazem-se necessários investimentos em tecnologias voltadas a melhoria da produção dos painéis à base de madeira, para que haja um desenvolvimento do setor.

As vantagens tecnológicas dos painéis aglomerados são atribuídas tanto à redução da heterogeneidade estrutural quanto à possibilidade de utilização, sem restrições em relação à forma, se comparados com a madeira maciça (ROWELL; HAN; ROWELL, 2000).

As indústrias de painéis de madeira apresentaram desenvolvimento significativo quanto à produção e à inovação tecnológica a partir dos anos de 1980, quando surgiu a necessidade de um melhor aproveitamento dos recursos florestais (matéria-prima), incentivando o desenvolvimento de novos produtos e processos produtivos (IWAKIRI; PEREIRA; NISGOSKI, 1999). De acordo com Haselein e Pauleski (2004), o desenvolvimento tecnológico do setor deve-se principalmente ao desenvolvimento de novos adesivos e de novos processos, tecnologias muitas vezes provenientes dos países industrializados.

As etapas do processo produtivo de painéis aglomerados foram descritas por diversos autores (BARROS FILHO, 2009; DIAS, 2005; IWAKIRI, 2005; MALONEY, 1996).

3.2.3 Panorama brasileiro de painéis aglomerados

No ano de 2004, foram produzidos painéis aglomerados em 89 países. Os quatro maiores produtores mundiais foram Estados Unidos (com 22,4% da produção mundial), Canadá (12,4%), Alemanha (10,3%) e China (5,9%). O Brasil ocupou a décima quarta posição, com 1,8% da produção do mundo. Porém o ritmo de crescimento da produção brasileira de aglomerados foi superior à de todos os países, para este período. Em âmbito nacional, a indústria de painéis particulados é responsável por grande parte da receita do setor florestal do país. Gera um número expressivo de empregos, justamente pela importância estratégica do segmento, que além de atingir seus resultados ainda supre a indústria moveleira, outro segmento de mercado em que o Brasil começa a se destacar internacionalmente (NOCE et al., 2008).

Segundo Oliveira (2010), o setor de painéis à base de madeira está em expansão no Brasil e no mundo, em virtude de fatores como a substituição da madeira maciça por materiais lignocelulósicos alternativos, desenvolvimento dos processos produtivos e aumento da demanda pelos diferentes tipos de painéis, impulsionado principalmente pela indústria de móveis e pela construção civil.

A expansão das indústrias de painéis à base de madeira aumenta notadamente a demanda por matéria-prima, forçando a busca por outros materiais. Uma alternativa encontrada por diversos pesquisadores nacionais e internacionais é o aproveitamento de materiais lignocelulósicos residuais provenientes da agroindústria (OLIVEIRA, 2010).

De acordo com a Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal (2014), após quase três anos de muito planejamento, surge a IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores), que terá sua sede em Brasília e um escritório em São Paulo. A IBÁ passa a ser a entidade de todo o setor florestal brasileiro, substituindo a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA), a Associação Brasileira da Indústria de Piso Laminado de Alta Resistência (ABIPLAR), a Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF) e a Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA).

A IBÁ, maior organização da indústria de base florestal em todo o mundo, é formada por um conglomerado de 70 empresas. A Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) nasce com uma receita bruta anual de 60 bilhões de reais, equivalente a 6% do produto interno bruto (PIB) do país. Cinco milhões de empregos, isto é, aproximadamente 5% da população

economicamente ativa (PEA) e oito bilhões de dólares em exportações, que representa cerca de 3% de todas as exportações brasileiras (ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL, 2014).

Dados do Ministério da Agricultura apontam que o cultivo comercial de florestas é responsável por movimentar cerca de 50 bilhões de reais ao ano e gerar 4,7 milhões de empregos diretos e indiretos. As florestas plantadas suprem importantes cadeias produtivas da economia, como a construção civil, geração de energia, produção de carvão vegetal, papel e celulose e indústria moveleira (CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS - CIFLORESTAS, 2015).

Em 2014, o Brasil produziu cerca de 17,2 milhões de metros cúbicos de resíduos à base de madeira. Neste mesmo ano, a produção brasileira de painéis aglomerados foi de aproximadamente 3,4 milhões de metros cúbicos (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2015).

3.2.4 Utilização de materiais alternativos em painéis aglomerados

A matéria-prima utilizada na produção de painéis aglomerados pode ser tanto de madeiras reflorestadas quanto do aproveitamento dos mais diversos tipos de resíduos florestais ou agroindustriais (DACOSTA, 2004). Materiais lignocelulósicos que conferem alta resistência mecânica e peso específico pré-estabelecido são utilizados como matéria-prima para produção de painéis de madeira aglomerada, justamente pela estrutura lignocelulósica ser semelhante à da madeira (ROWELL; HAN; ROWELL, 2000).

Mendes (2008) afirma que os resíduos gerados pela agroindústria brasileira possuem potencial de aproveitamento em diversas aplicações, como compostagem (adubo orgânico), extração de óleos e resinas, fabricação de painéis aglomerados, produção de briquetes, entre outros. Além de contribuir para o reaproveitamento dos resíduos, ainda agregam valor aos mesmos.

Segundo Bidone (1999), com a intensificação das atividades industriais, o crescimento populacional e o crescente consumo aumentaram a quantidade e os tipos de resíduos gerados, causando impactos alarmantes ao meio ambiente. Utilizações mais criativas, que agregam mais valor a tais resíduos, podem modificar esse panorama, gerando nova demanda de produtos e serviços, além de gerar empregos e renda.

O Brasil possui um grande potencial de produção de recursos renováveis como produtos agrícolas e florestais. Segundo Tamanini e Haully (2004), a produção de resíduos nestes segmentos é de aproximadamente 250 milhões de toneladas por ano. Sua utilização correta e adequada ajuda a minimizar problemas ambientais e energéticos, além de gerar produtos com relevantes aplicações na indústria.

Os resíduos sólidos provenientes da agroindústria, quando associados à disposição inadequada, além de provocar perda de nutrientes e de biomassa aumenta o potencial poluidor destes materiais. Esta poluição pode atingir o solo e os recursos hídricos, quando ocorre a lixiviação de compostos, e também acarretar problemas de saúde pública. Neste contexto, o elevado custo associado ao tratamento, ao transporte e à disposição final correta dos resíduos gerados, contribui significativamente no aumento do preço do produto final concebido a partir da utilização destes resíduos (ROSA et al., 2011).

Dentre a grande diversidade de resíduos lignocelulósicos produzidos pela agroindústria brasileira, destacam-se o sabugo de milho, o bagaço de cana-de-açúcar, as cascas de (aveia, arroz, café, coco, mamona e amendoim), o bambu, os caules de bananeira e a mandioca, entre outros (MENDES, 2008).

Thole e Weiss (1992) testaram diversos resíduos como materiais alternativos na produção de painéis de partículas e constataram que o bagaço de cana-de-açúcar foi o material mais adequado quando comparado com outros resíduos agroindustriais. Estes autores afirmaram, ainda, que na produção de painéis de materiais alternativos deve-se atentar aos diferentes componentes presentes nos materiais testados, justamente por alguns deles não apresentarem bom desempenho na produção dos painéis e, possivelmente, se comportarem de maneira indesejada.

O melhor aproveitamento dos resíduos gerados pelas indústrias que processam madeira fez a indústria de painéis reconstituídos aumentar anualmente os investimentos em qualidade da produção e em equipamentos e processos (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

Com o objetivo de melhorar algumas propriedades dos painéis de madeira aglomerada, são incorporados, durante a aplicação do adesivo, alguns aditivos químicos, como catalisador ou endurecedor, emulsão de parafina, retardantes de fogo e repelentes a organismos xilófagos que, segundo Iwakiri (2003) e Maloney (1977), são os aditivos mais comumente utilizados na produção de aglomerados.

3.3 MATÉRIAS-PRIMAS EMPREGADAS

Este subitem apresenta detalhes a respeito das principais matérias-primas utilizadas no presente estudo, levando em consideração questões de sustentabilidade ambiental, atualmente muito discutidas.

Segundo Amico et al. (2001), o Brasil apresenta condições climáticas extremamente favoráveis à agricultura, com solos férteis e abundantes. Neste cenário, há necessidade de promover o desenvolvimento econômico e social autossustentável. Iniciativas e projetos cujo produto utilize matéria-prima de origem vegetal podem agregar valor a estes produtos, além de gerar benefícios ambientais e sociais com a utilização de materiais de procedência natural.

3.3.1 Madeira de *Pinus*

A redução da oferta de madeira de florestas nativas, devido aos prejuízos causados pela exploração seletiva e predatória, principalmente pela expansão da fronteira agrícola, mineração e produção de carvão vegetal, vem aumentando o mercado de florestas plantadas em todo o mundo (MENDENS; ALBUQUERQUE; IWAKIRI, 2003).

O Brasil possuía, em 2012, aproximadamente 7,2 milhões de hectares de florestas plantadas. Deste total, o gênero *Eucalyptus* representava 5,1 milhões de hectares (70,8%), o gênero *Pinus* 1,6 milhões de hectares (22,2%), enquanto outras espécies representavam 0,52 milhões de hectares, ou seja, 7,2% do total. As outras espécies que compõem os 7,2% da área total plantada são a Acácia (*Acacia mearnsii* e *Acacia mangium*), Araucária (*Araucaria angustifolia*), Pópulus (*Populus* spp.), Teca (*Tectona grandis*), Seringueira (*Hevea brasiliensis*) e Paricá (*Schizolobium amazonicum*). Com o crescimento da demanda por madeiras de reflorestamento, surgem diversas possibilidades de materiais alternativos, em substituição às madeiras nativas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

De acordo com o Centro de Inteligência em Florestas – CIFLORESTAS (2015), site de informações do setor florestal, criado em 2008, e gerenciado por especialistas de floresta, economia e gestão do agronegócio de universidades de notado prestígio no segmento florestal, apresentam algumas características botânicas do gênero *Pinus* pertence à ordem *Coniferae*, do

grupo das *Gymnospermae*. Sua área de ocorrência natural vai desde a região polar até os trópicos, englobando os continentes da Europa, Ásia, América do Norte e Central, não ocorrendo naturalmente na América do Sul.

O gênero *Pinus* apresenta 105 espécies identificadas, fisiologicamente resistentes à seca, suportando temperaturas na faixa de -65 a 50°C. Apresentam diferentes exigências quanto à fertilidade, textura e profundidade do solo. Devido à sua grande versatilidade, possibilitam o plantio em diferentes condições de ambiente. As espécies mais plantadas no Brasil são: *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* (que toleram geadas), *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa* e *Pinus tecunumanii* (estas toleram déficit hídrico), sendo os plantios predominantemente nos estados da região sul do país (CIFLORESTAS, 2015).

A madeira do gênero *Pinus* é utilizada como matéria-prima para a produção de celulose de fibra longa e papel de maior resistência mecânica, chapas (lâminas, partículas e fibras), móveis, tábuas, que são empregadas na construção civil e nas indústrias de embalagens. O gênero como um todo pode produzir resina que, destilada, fornecerá Breu (fase sólida, usado na produção de colas, vernizes, tintas e adesivos) e Terebintina (fase líquida, usado na indústria de solventes, fungicidas e germicidas). A espécie com maior produtividade é o *Pinus elliottii* (CIFLORESTAS, 2015).

3.3.2 Casca de aveia

A aveia, cereal do gênero *Avena* e da família *Gramineae*, começou a ser cultivada recentemente, se comparada a outras culturas, como o trigo. O cultivo se iniciou no norte da Europa, devido ao aumento do uso de cavalos como animais de trabalho, cerca de dois mil anos antes de Cristo (CERES, 2003 apud TAMANINI et al., 2004, p. 117).

Segundo Sá (1995), há múltiplas possibilidades de utilização da aveia como produção de grãos (alimentação humana e animal), forragem (feno, silagem ou cortada e fornecida fresca no cocho), cobertura do solo e adubação verde (proteção e melhoria das condições físicas do solo), além de inibir as infestações de plantas invasoras.

No Brasil, resíduos da agroindústria estão disponíveis em grande volume, apresentando significativo potencial de emprego. Dentre esses resíduos agroindustriais, a casca de aveia gerada no processo de beneficiamento do cereal aveia apresenta um grande

potencial principalmente em relação à quantidade de matéria-prima. De acordo com Webster (1986), a casca de aveia representa cerca de 30% da massa do cereal aveia. A produção brasileira de aveia foi de aproximadamente 370 mil toneladas em 2014 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2015). Desta maneira, a produção brasileira de casca de aveia foi de aproximadamente 111 mil toneladas em 2014.

A casca de aveia, subproduto do processamento do cereal, é descartada durante o processamento, tornando-se um poluente ao meio ambiente. Portanto, é necessário e essencial estabelecer alternativas para sua reutilização.

Alguns estudos com casca de aveia têm sido desenvolvidos, em segmentos como: aproveitamento de resíduos de casca de aveia para produção de painéis de partículas (SOUZA et al., 2014; VARANDA et al., 2013; VARANDA et al., 2014), melhoramento genético da cultura de aveia (BORGES et al., 2009), uso da casca de aveia para produção de xilitol (TAMANINI et al., 2004; TAMANINI E HAULY, 2004) e farinha de aveia utilizada como extensor em adesivo (RIBEIRO, 2008).

3.3.3 Adesivos

O adesivo é um componente de grande importância na produção dos produtos derivados da madeira, com implicações técnicas e econômicas expressivas, com seu custo podendo representar até 50% do custo total do produto final (CARNEIRO et al., 2004). Kollmann, Kuenzi e Stamm (1975), classificam os adesivos para madeira em três grupos: os de origem natural (caseína, soja, osso, couro e sangue), os sintéticos termorrígidos (ureia, fenol, melamina, resorcinol, tanino e epóxi), que são convertidos a um estado insolúvel, irreversível, por meio de reações químicas com ou sem aplicação de calor e, os sintéticos termoplásticos (polivinilcloreto, polivinilacetato e elastômeros), resistentes somente a mudanças físicas, podendo sofrer alterações pela ação do calor ou de solventes.

Os adesivos utilizados na madeira têm desempenhado notável importância no desenvolvimento e na expansão das indústrias de produtos florestais, sendo responsáveis pela boa aceitação e pela eficiência desses produtos. A maior parte dos adesivos para madeira é destinada à fabricação de chapas (laminados, particulados e de fibras), empregados principalmente na construção civil e indústrias de móveis (VICK, 1999).

Os principais tipos de resina utilizados pelas indústrias de painéis à base de madeira

são a ureia formaldeído (UF), fenol formaldeído (FF), melamina formaldeído (MF) e difenilmetano diisocianato (MDI). Pelo fato de o adesivo ser o componente de maior custo do painel, é fundamental definir o tipo e quantidade de adesivo a ser utilizado, procurando melhorar a relação custo-benefício (MARRA, 1992).

De acordo com Saldanha (2004), algumas indústrias produzem adesivos compostos de melamina ureia formaldeído (MUF) e fenol melamina ureia formaldeído (PMUF), como alternativa para produção de painéis com melhor estabilidade dimensional e custo semelhante ao de quando se utiliza apenas um tipo de adesivo.

Os quatro adesivos sintéticos fenol formaldeído, melamina formaldeído, ureia formaldeído e resorcinol formaldeído são derivados de combustíveis fósseis e responsáveis por cerca de 90% de todos os adesivos utilizados nas indústrias que produz chapas à base de madeira (CAMPOS e LAHR, 2004).

Diversos fatores podem influenciar o desempenho da colagem, tanto relacionados à madeira quanto ao adesivo empregado. Como fatores relacionados à madeira têm-se suas características anatômicas, químicas e físicas (LIMA et al., 2007). A influência da anatomia da madeira no processo de colagem está diretamente relacionada à sua distinta estrutura anatômica, como dimensão, disposição e frequência dos elementos celulares que, conseqüentemente, estão relacionadas à porosidade e à permeabilidade da madeira. Por sua vez, estas últimas influenciam na mobilidade e na penetração do adesivo (MARRA, 1992; PIZZI, 1994).

Constituintes químicos da madeira (como os extrativos) podem aumentar a durabilidade da madeira alterando sua permeabilidade em relação à penetração do adesivo e, quando presentes na linha de cola, os extrativos podem reagir com o adesivo ou interferir nas reações de polimerização deste, gerando linhas de cola com baixo desempenho (CAIXETA, 2000; JANKOWSKY, 1988; LIMA et al., 2007). As características anatômicas, químicas e físicas da madeira estão relacionadas, na maioria dos casos, tornando conveniente discutir tais características de forma holística. Dentre os fatores físicos que influenciam a colagem, têm-se a umidade, a área específica de colagem, a preparação da superfície da madeira que irá receber o adesivo e a densidade (VICK, 1999).

Por parte do adesivo, os fatores que influenciam o desempenho da colagem são a sua composição e as características físicas e químicas (viscosidade, teor de sólidos e pH) (FRANKLIN ADHESIVES AND POLYMERS, 2003; KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975), além de fatores correlacionados ao processo de produção de painéis de madeira

aglomerada, como as variáveis do ciclo de prensagem, isto é, temperatura, tempo e pressão (VICK, 1999).

O tempo de gelatinização ou gel time é outra característica físico-química dos adesivos de suma importância no processo de colagem. Gel time é definido como sendo o tempo desde a preparação do adesivo que será utilizado até seu endurecimento (fase de gel), quando atinge a máxima elasticidade. O gel time está relacionado à vida útil do adesivo ou tempo de “panela”, que é quando atinge a máxima viscosidade possível para sua aplicação (IWAKIRI, 1998).

Dias (2005) salienta, em seu trabalho, a importância de considerar também a influência do pH tanto da madeira quanto do adesivo. O pH do adesivo a ser aplicado deve estar na faixa de 1,5 a 11, justamente pela possibilidade de degradar as fibras da madeira e interferir no desempenho da colagem, prejudicando a qualidade final do produto colado.

3.3.3.1 Adesivo melamina formaldeído

Os adesivos melamina formaldeído e fenol formaldeído são mais indicados para aplicações que necessitam de resistência à umidade, como painéis de partículas para uso em ambientes externos ou com alta umidade relativa (KELLY, 1977).

Segundo Iwakiri (2005), em relação ao desempenho físico-mecânico, o adesivo melamina formaldeído (MF) é intermediário entre a ureia formaldeído e o fenol formaldeído. A vida útil, em termos de armazenagem, é em torno de uma semana, na forma líquida, à temperatura de 30 a 35 °C. Na sua forma em pó, essa vida útil de armazenagem pode chegar a um ano.

O adesivo melamina formaldeído apresenta coloração branca leitosa. Apresenta algumas características como maior resistência a umidade em relação ao adesivo ureia formaldeído e cura mais rápida se comparado ao adesivo fenol formaldeído. Entretanto, seu custo é de três a quatro vezes maior que o adesivo ureia formaldeído e de 20 a 25% maior que o adesivo fenol formaldeído (IWAKIRI, 2005).

Na produção do precondensado de melamina formaldeído, o pH situa-se na faixa de 8,5 a 9, com a finalidade de não acelerar excessivamente a reação de condensação. Porém, a cura final ocorre no meio ácido, com a utilização dos mesmos catalisadores do adesivo ureia formaldeído (IWAKIRI, 2005).

Campos e Lahr (2004) afirmam que os adesivos à base de melamina formaldeído geralmente possuem cura a quente, na faixa de 115 a 160 °C. O adesivo MF apresenta como principais desvantagens pequena vida útil em solução aquosa, alto custo de produção e impossibilidade de prensagem a frio. Como principais vantagens tem-se a possibilidade de cura sem catalisador e maior resistência à umidade.

3.3.3.2 Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona

No início dos anos de 1980, os estudos relacionados aos adesivos tiveram grande impulso no Brasil com pesquisas e desenvolvimento dos adesivos à base de resinas poliuretanas, pelo Departamento de Química e Física Molecular, atual Instituto de Química de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo. Pesquisadores desenvolveram uma resina poliuretana à base de óleo de mamona, que possui diversas vantagens como alta resistência à ação de água e raios ultravioleta, manipulação em temperatura ambiente, alta resistência mecânica e de procedência majoritariamente natural e renovável, abundante em todo país (JESUS, 2000).

Internacionalmente conhecida como Castor Oil e, no Brasil, também por Caturra, a mamona (*Ricinus communis*) é uma planta da família das *euforbiáceas*, da qual é extraído o óleo empregado na fabricação do adesivo poliuretano com base nele. De acordo com Peterson (1964), painéis colados com adesivos poliuretanos conferiram alta resistência à umidade e propriedades mecânicas superiores, se comparados aos painéis colados com resinas fenólicas, além de não emitirem formaldeído.

Foram realizados diversos ensaios por Araújo (1992), para determinar características de várias composições de adesivos poliuretanos à base de óleo de mamona. Constatou-se em relação à estabilidade térmica das poliuretanas, através dos termogramas dos ensaios, que ocorre uma pequena perda de massa até 220°C, o que relata a estabilidade térmica desta resina até a referida temperatura.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, no âmbito de materiais alternativos para produção de painéis de partículas (BARBIRATO et al., 2014; BERTOLINI et al., 2014; BEZERRA et al., 2015; CHRISTOFORO et al., 2016; FERRO et al., 2015; GAVA et al., 2015; MACEDO et al 2015;

PAES et al., 2011; SILVA et al., 2014; VARANDA et al., 2014).

3.4 PARÂMETROS QUE AFETAM O DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS

A qualidade dos painéis à base de madeira é avaliada por intermédio de suas propriedades físico-mecânicas, como tração perpendicular, módulo de elasticidade e módulo de ruptura na flexão estática, resistência ao arrancamento de conectores, absorção de água, inchamento em espessura, entre outros (IWAKIRI, 2005).

Maloney (1977) afirma que fatores como o teor de umidade e a homogeneidade dimensional das partículas influenciam diretamente nas propriedades finais dos painéis de madeira aglomerada. Outro fator influente no desempenho mecânico dos painéis produzidos é a densidade. Esta deve ser o mais uniforme possível ao longo da espessura do painel (quando este for de apenas uma camada) e ao longo da mesma camada da espessura do painel (quando este possuir três ou cinco camadas), para garantir a uniformidade das suas propriedades físicas e mecânicas.

Os painéis de partículas geralmente são produzidos com densidade na faixa de 600 a 700 kg/m³. Segundo Kelly (1977), é necessário um grau de compactação mínimo das partículas de madeira a fim de ocorrer a consolidação do painel de partículas durante o ciclo de prensagem. Iwakiri et al. (2005) produziram em seu trabalho painéis aglomerados de alta densidade e seus resultados demonstraram um aumento tanto na estabilidade dimensional quanto nas propriedades mecânicas, devido ao aumento na densidade e no teor de adesivo melamina ureia formaldeído.

Melo et al. (2009) fizeram a caracterização física e mecânica de painéis de partículas produzidos com madeira de *Eucalyptus grandis* e casca de arroz. Seus resultados mostraram que o acréscimo da casca de arroz proporcionou maior instabilidade dimensional e menor resistência dos painéis. Em seu trabalho, Melo et al. (2009) analisaram a influência da adição de casca de arroz nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, como na flexão estática (nos módulos de elasticidade e de ruptura), na tração perpendicular e na densidade, além de outras propriedades.

O adesivo é um fator relevante na produção de aglomerados e a quantidade a ser utilizada é baseada na massa seca das partículas que, para Maloney (1977), a quantidade de

adesivo para aglomerados pode variar de 5 a 10%. Iwakiri (2005) afirma que normalmente a quantidade de adesivo para produção de painéis de madeira aglomerada deve situar na faixa de 6 a 12% e que se deve atentar à homogeneidade na distribuição do adesivo sobre a superfície das partículas, de modo a garantir propriedades uniformes sobre toda a extensão do painel produzido.

Dois fatores decisivos na qualidade final de chapas de madeira aglomerada são a homogeneidade das partículas e o ciclo de prensagem dos painéis. Deve-se reduzir ao máximo possível a heterogeneidade das partículas utilizadas e distribuí-las de maneira correta na peneira classificadora, de modo a garantir propriedades uniformes ao longo da extensão dos painéis. Quanto ao ciclo de prensagem, este deve ser procedido de forma eficiente, obedecendo criteriosamente às variáveis de prensagem (tempo, temperatura e pressão), garantindo a cura completa do adesivo, a densificação e a consolidação do colchão de partículas até a espessura final desejada para o painel (IWAKIRI, 2005; MOSLEMI, 1974).

Barros Filho (2009) classifica e discute as variáveis que influenciam a qualidade dos painéis aglomerados em variáveis relacionadas às partículas (densidade, umidade, extrativos e pH) e em variáveis relacionadas ao processo de produção (geometria das partículas e razão de compactação).

Espécies de madeira com alto teor de extrativos têm grande probabilidade de ocasionar estouros no painel quando este chegar ao final do ciclo de prensagem. Os extrativos também influenciam na cura do adesivo, além de resultar numa linha de cola com desempenho e resistência inferiores ao desejado (CLOUTIER, 1998).

A razão de compactação também é tida como um parâmetro de grande relevância e exerce muita influência na qualidade final do painel de madeira aglomerada. É definida como sendo a relação existente entre a densidade do painel e a densidade das partículas (MOSLEMI, 1974). Preferencialmente, deve-se optar por trabalhar com partículas de menor densidade para conferir ao painel boa compactação e média densidade, além de garantir área de contato entre as partículas, proporcionando uma colagem de qualidade.

Outro ponto importante é conseguir, também, propriedades físicas e mecânicas que satisfazem as exigências normativas, com produção de painéis aceitáveis pelo mercado (MENDES, 2001).

Iwakiri (2005) afirma que a razão de compactação para painéis de madeira aglomerada deve ser de no mínimo 1,3, para que ocorra a densificação necessária para a formação do painel. Já para Maloney (1993) e Moslemi (1974), a razão de compactação deve situar-se na

faixa de 1,3 a 1,6, para que ocorra um contato adequado entre as partículas de madeira e formação da ligação adesiva entre elas.

3.5 PISOS DE MADEIRA

Os pisos de madeira mais conhecidos e utilizados atualmente são os constituídos de madeira maciça e os engenheirados (compostos em múltiplas camadas). Os pisos de madeira maciça são feitos, majoritariamente com madeiras tropicais, enquanto os pisos engenheirados são constituídos por camadas de diferentes materiais, chamadas de camada superficial, substrato (painel à base de madeira) e camada de balanceamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI, 2009).

Andrade (2011) realizou um estudo dos custos relativos à produção de pisos de madeira no Brasil. Neste estudo, o autor considerou todos os tipos de pisos de madeira, ou seja, tanto os de madeira maciça quanto os engenheirados. Os maiores custos de produção se referem às matérias-primas madeira, adesivo e revestimento, mão de obra e carga tributária.

Em 2010, a produção brasileira de pisos de madeira superou os 25 milhões de metros quadrados, sendo cerca de 13 milhões de metros quadrados de pisos engenheirados (ANPM, 2015).

Os pisos engenheirados são subdivididos em estruturados e laminados. Os estruturados são constituídos por uma base de painel derivado de madeira e revestidos por madeira serrada ou lâminas de madeira. Os pisos engenheirados laminados são painéis de madeira reconstituída (podem ser painéis compensados, de fibras ou de partículas de alta densidade), revestidos por uma camada de papel impregnado com resina melamínica que proporciona padrões decorativos imitando a madeira sólida natural (ANDRADE, 2011).

Segundo a Eucatex (2015), os pisos laminados melamínicos são produzidos com quatro camadas diferentes e com funções específicas: substrato, balanceador, laminado e overlay. Substrato é o painel de madeira de alta densidade, colado com resina em processo contínuo com alta temperatura e pressão. Balanceador é a camada constituída por lâmina de celulose e impregnada com resina melamínica, que garante a estabilidade dimensional do piso, além de protegê-lo contra a umidade proveniente do contrapiso. Laminado é um revestimento decorativo de celulose impregnado com resina melamínica, que determina o

padrão do piso laminado e proporciona beleza ao produto. Overlay é um filme cristalino de celulose, com partículas de óxido de alumínio, impregnado com resina melamínica, que garante alta resistência a riscos e à abrasão ao piso laminado. Sua baixa porosidade evita a absorção de líquidos e facilita a limpeza.

O piso engenheirado é tido como uma escolha mais correta ambientalmente, pelo fato de apenas a camada do topo dos pisos laminados ser constituída de madeira tropical. O restante do piso é feito do aproveitamento de materiais lignocelulósicos, reduzindo a demanda por essências tropicais. O piso engenheirado oferece toda a beleza dos pisos de madeira tradicionais, além de apresentar como principal vantagem, se comparado ao piso de madeira maciça, excelente estabilidade dimensional. O piso de madeira maciça sofre mudanças dimensionais consideráveis com a variação da umidade do ambiente, justamente por apresentar anisotropia. Isto não ocorre com os pisos engenheirados e possibilita sua instalação em locais com maior variação de umidade, além de normalmente serem colados diretamente sobre o contrapiso (ANDRADE, 2011).

3.5.1 Painéis de alta densidade para pisos

Na produção brasileira de pisos de madeira, a matéria-prima básica, tradicionalmente oriunda de florestas nativas, está sendo gradativamente substituída por painéis de madeira reconstituída, provenientes de madeiras de reflorestamento, como as espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Estas apresentam, entre outras vantagens, rápido crescimento, alta produtividade, redução da idade de corte, segurança de abastecimento, menor heterogeneidade, além da possibilidade de minimizar o uso de espécies de madeira oriundas de florestas nativas (IWAKIRI et al., 2008).

A partir deste contexto, evidencia-se a necessidade de estudos da aplicação de insumos alternativos na produção de pisos, tanto para reduzir a demanda por madeiras tropicais quanto para suprir o aumento da demanda de matéria-prima pelas indústrias do segmento de pisos de madeira. A redução do desmatamento de florestas nativas traz uma série de benefícios ambientais, econômicos e sociais. Sabe-se que a agricultura (principalmente a soja) e a pecuária (especificamente a criação de bovinos de corte) são os grandes responsáveis pelo desmatamento da Amazônia. Mas as indústrias madeireiras, especialmente as do setor de

pisos de madeira maciça, também tem relevante participação neste processo de extinção da floresta nativa. Recentemente, um estudo inédito publicado na renomada *Nature Geoscience Letter* apresenta os benefícios da redução do desmatamento na Amazônia. Reddington et al. (2015) mostram, pela primeira vez, que a redução do desmatamento implica melhoria da qualidade do ar e, conseqüentemente, reduz as mortes causadas pela exposição à poluição atmosférica na maior parte da América do Sul. Afirmam que a melhor qualidade do ar da região contribui para impedir a morte precoce de cerca de 1700 adultos por ano, em toda a América do Sul.

Os autores deste estudo destacam, ainda, a expressiva redução de 40% na taxa de desmatamento, diminuindo de 37,8 mil quilômetros quadrados (km²) ao ano entre 2002 e 2004 para 22,9 mil km² ao ano no período de 2009 a 2011. Paulo Artaxo, um dos autores e professor da USP, afirmou que essa forte redução do desmatamento da Amazônia resultou numa diminuição, de aproximadamente 70%, na emissão de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos (REDDINGTON et al., 2015).

Os painéis de alta densidade apresentam melhor desempenho para pisos se comparados aos painéis de média densidade. Dentre estes painéis têm-se o aglomerado de alta densidade (High Density Particleboard – HDP) e o High Density Fiberboard - HDF. A alta densidade dos painéis confere ao piso melhores propriedades mecânicas, como resistência, rigidez e dureza, além de melhor estabilidade dimensional (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Pesquisadores norte-americanos estudaram e desenvolveram técnicas para fabricação de aglomerado de bagaço de cana com propriedades desejadas para aplicações em pisos laminados. Tais painéis apresentaram desempenho físico e mecânico ótimos, que atenderam aos requisitos das normas técnicas para aglomerados. Em alguns tratamentos, o desempenho mecânico dos painéis foi muito superior aos requisitos normativos (WU, 2003).

Segundo Iwakiri et al. (2005), algumas indústrias de aglomerados já vinham produzindo painéis de alta densidade de matérias-primas alternativas (como resíduos de poda de árvores e cavacos de marcenarias) destinados a pisos laminados. Para tal aplicação, é imprescindível considerar: alta densidade do painel - acima de 800 kg/m³ (IWAKIRI, 2005; KOLLMANN; KUENZI e STAMM, 1975; MALONEY, 1993), partículas com dimensões menores visando melhor acabamento superficial e uso de adesivo resistente à umidade.

Iwakiri et al. (2005) produziram em seu trabalho painéis aglomerados de alta densidade (entre 800 e 900 kg/m³) e seus resultados demonstraram um aumento tanto na estabilidade dimensional quanto nas propriedades mecânicas, devido o aumento na densidade

e no teor do adesivo melamina ureia formaldeído.

Outros dois trabalhos recentes com aglomerados de alta densidade, produzidos a partir de resíduos, apresentam grande potencial para aplicação em pisos. Bertolini et al. (2014) produziram e avaliaram o desempenho de painéis de partículas *Pinus* sp. obtidas de rejeitos tratados com preservante CCA e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Os painéis produzidos por Bertolini et al. (2014) apresentaram densidade na faixa de 760 a 880 kg/m³, módulo de elasticidade na faixa de 1947 a 2200 MPa e módulo de ruptura na faixa de 17,37 a 22,46 MPa.

Fiorelli et al. (2015) produziram painéis de partículas monocamadas com resíduos de *Pinus* spp. e fibras de coco verde. Tais painéis apresentaram densidade na faixa de 720 a 850 kg/m³, módulo de elasticidade na faixa de 859 a 2341 MPa e módulo de ruptura na faixa de 8,68 a 25,85 MPa.

3.5.2 Características do setor de pisos de madeira

De acordo com Andrade (2011), há divergências quanto às estatísticas mundiais relacionadas a pisos de madeira e dificuldade de obtenção de informações seguras, justamente por não existir uma classificação fiscal específica para pisos de madeira. Em 2010, os dois países que mais exportaram pisos de madeira foram a China, com 33,3% da exportação mundial, e a Indonésia, com 9,3%. O Brasil ocupa a sétima posição, representando 4,5% de toda exportação mundial.

As indústrias do setor florestal brasileiro geralmente se caracterizam por exportar principalmente matéria-prima, de baixo valor agregado, fato não interessante do ponto de vista econômico e social. A indústria brasileira dos chamados produtos de madeira de maior valor agregado (PMVA) ainda é recente, necessitando a adoção de estratégias e ações para o seu adequado desenvolvimento. As indústrias de PMVA tem sua importância relacionada com a maior geração de renda e empregos, impactando positivamente o cenário econômico do setor florestal brasileiro (ANDRADE et al., 2014).

A indústria madeireira, de uma maneira geral, gera grandes quantidades de resíduos. Essa quantidade, em alguns processos industriais madeireiros, pode ultrapassar 50% de toda matéria-prima que entra no processo. Esta geração de resíduos é maior no processamento

primário da madeira (madeira em tora transformada em pranchas e tábuas) do que em processamentos secundários (BRAND, 2010). De acordo com Andrade (2011), o aproveitamento médio da maioria das indústrias de pisos de madeira tropical é na faixa de 51 a 60%.

Mantega, Uliana e Nolasco (2012) realizaram um estudo em uma indústria de pisos de madeira e identificaram três principais pontos críticos geradores de resíduos: qualidade da matéria-prima madeireira, desenho do produto e materiais tóxicos de acabamento, em que o primeiro ponto destacado é o principal gerador de resíduos.

A disponibilidade de matéria-prima (floresta nativa) para as indústrias do setor de pisos de madeira esta ameaçada, causadas pelo desmatamento acelerado, exploração predatória, além das aprovações das concessões serem burocráticas e muito lentas. É importante destacar que, atualmente, se houvesse matéria-prima de procedência legal e disponível em quantidade adequada, a geração de renda estimada aumentaria cerca de 20% e evitaria a paralisação e/ou fechamento de indústrias do setor. Tornam-se necessárias ações urgentes para garantir a disponibilidade de matéria-prima legalizada e com preços adequados para o pleno funcionamento das indústrias do setor (ANDRADE et al., 2014).

Em diversas indústrias madeireiras, o montante de resíduo gerado está sendo reaproveitado com baixo ou nenhum investimento, gerando lucro ou sendo uma finalidade adequada, apenas se comparado a situação anterior (de não aproveitar os resíduos). Algumas das utilizações destes resíduos são: utilização da biomassa para fornos de indústrias cerâmicas, serragem para forragem de aviários, produção de compostos orgânicos para jardinagem e horticultura e produção de artesanatos a partir de pequenos cortes e sobras de toras e tábuas (LIMA; SILVA; VIEIRA, 2007).

O aproveitamento de resíduos de serrarias e indústrias de pisos de madeira maciça pode ser utilizado na produção de painéis à base de madeira. Esta se torna uma medida sustentável, onde aproveita os resíduos da indústria de pisos maciços na própria cadeia produtiva de pisos (painéis à base de madeira para aplicação em pisos), além de agregar mais valor ao produto final, sendo classificado como produto de madeira de maior valor agregado – PMVA (ALMEIDA, 2013). Resíduos descartados anteriormente ou utilizados em aplicações menos nobres, sem agregar muito valor, podem ser beneficiados e convertidos em produtos de qualidade e maior valor agregado, aplicados na construção civil, como pisos, forros, móveis etc (FOELKEL, 2008).

Segundo Andrade et al. (2014), os pisos de madeira apresentam agregação de valor superior à 190% em relação à madeira serrada bruta. Porém, atualmente, a participação deste

segmento é pequena no mercado, levando em conta o grande potencial florestal brasileiro. Países como China, Indonésia, Malásia e Áustria apresentam as maiores exportações mundiais de pisos de madeira, enquanto o Brasil representa menos de 5% da exportação de pisos de madeira (sólidos e laminados). O mercado nacional também é pouco expressivo, se comparado ao consumo total de revestimentos. A participação dos pisos de madeira maciça foi de 0,5% do total do consumo de revestimentos, enquanto os pisos cerâmicos e porcelanatos representam cerca de 90%.

A indústria madeireira tem a madeira como principal insumo, um material de complexa trabalhabilidade justamente por ser uma matéria-prima orgânica e heterogênea, apresentando muitos desafios, tanto em relação à sua qualidade quanto ao controle de qualidade dos produtos à base de madeira. Isso ocorre principalmente no setor de produtos com maior valor agregado – PMVA, cujos custos são elevados, a tecnologia se renova rapidamente e os retrabalhos requeridos são constantes (ALMEIDA, 2013; KOZAK; MANESS, 2003).

O setor brasileiro de pisos de madeira maciça destina a maioria de seus produtos para o mercado externo e, atualmente, a situação global não tem favorecido a exportação. Além disso, fatores internos gerais e específicos interferem afetando o desempenho das indústrias (ANDRADE et al., 2014).

Feigenbaum (1994) afirma que padrões claros e de qualidade são necessários, em relação à qualidade dos produtos, em função do aumento das exigências dos consumidores. De acordo com a Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira – ANPM, que coordena a comissão de estudos da ABNT responsável pelo desenvolvimento de normas para pisos de madeira, a elaboração de padrões referenciais é a primeira medida para a implantação de sistemas de qualidade em produtos. Em se tratando das normas oficiais no Brasil, são elaboradas por um processo aberto, onde toda sociedade pode participar das consultas públicas e reuniões. Na elaboração das normas, ocorrem discussões das quais participam produtores (indústrias), consumidores (clientes) e neutros (instituições de ensino e pesquisa) (ANDRADE, 2011; ANDRADE et al., 2014).

Takeshita, Andrade e Jankowsky (2011) destacam que a carência de normas técnicas se torna um dos principais obstáculos para o desenvolvimento do setor de pisos de madeira no Brasil. Até 2010 só existiam duas normas no Brasil que tratavam especificamente de pisos de madeira (ANDRADE, 2011).

Deve ser destacada, a necessidade de requisitos normativos para painéis de partículas

de alta densidade, visto que a ABNT só tem uma norma em relação aos painéis de partículas de média densidade (ABNT NBR 14810:2013).

3.5.3 Espécies de madeira tropical estudadas

As três espécies de madeiras tropicais brasileiras utilizadas neste estudo foram: Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Jatobá (*Hymenaea* sp.).

Em relação às propriedades físicas da madeira sólida, a densidade é apontada como um dos principais parâmetros de utilização, por ter correlações diretas com diversas outras propriedades e também com a composição celular da madeira, permitindo associações com a qualidade final da madeira e seu comportamento nos processos industriais e tecnológicos (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010; MÜLLER et al., 2014; OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005).

Todas as informações referentes às três espécies utilizadas neste estudo foram detalhadas a partir de dados contidos nas informações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2015).

3.5.3.1 Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*)

O Angelim Vermelho possui outros nomes populares: angelim, angelim falso, angelim ferro, angelim pedra, angelim pedra verdadeiro, faveira carvão, faveira dura, faveira ferro e faveira grande.

Sua ocorrência no Brasil é na Amazônia, nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Rondônia. Em outros países o Angelim Vermelho é encontrado na Guiana, Guiana Francesa e no Suriname.

O Angelim Vermelho apresenta densidade aparente (a 15% de umidade) de 1090 kg/m³. Algumas características organolépticas de sua madeira: cerne e alburno pouco distintos pela cor, com cerne castanho avermelhado, brilho moderado, cheiro desagradável e gosto imperceptível, densidade alta, madeira dura ao corte, grã direita a irregular, textura média a grossa e superfície pouco lustrosa.

A madeira de Angelim Vermelho é difícil de ser trabalhada, mas recebe bom acabamento. É fácil de tornear com bom acabamento e, na furação, apresenta desempenho regular.

Seus principais usos são: na construção civil pesada externa (pontes, postes, estacas, esteios, cruzetas, dormentes ferroviários e obras portuárias), na construção civil pesada interna (vigas e caibros) e em outros usos, como cabos de ferramentas (IPT, 2015).

3.5.3.2 Cumarú (*Dipteryx odorata*)

O Cumarú possui outros nomes populares: camarú, camarú ferro, cambaru, cambaru ferro, champanha, cumarú amarelo, cumarú da folha grande, cumarú escuro, cumarú ferro, cumarú rosa, cumarú roxo, cumarú verdadeiro, cumbari, cumbaru ferro e muirapagé.

Sua ocorrência no Brasil é na Amazônia, nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Cumarú também é encontrado na América Central, Bolívia, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela.

O Cumarú possui densidade aparente (a 15% de umidade) de 1090 kg/m³. Algumas características organolépticas de sua madeira: cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho claro amarelado, brilho moderado, cheiro e gosto imperceptíveis, densidade alta, dura ao corte, grã revessa, textura fina a média, aspecto fibroso atenuado e superfície pouco lustrosa.

A madeira de cumarú é difícil de ser trabalhada, mas recebe excelente acabamento no torneamento, acabamento ruim nos trabalhos de plaina e lixa, e é difícil de ser perfurada. Devido à sua natureza oleosa, esta madeira apresenta dificuldade em ser colada. Aceita polimento, pintura, verniz e lustre.

Seus principais usos são: na construção civil pesada externa (pontes, postes, estacas, esteios, cruzetas e dormentes ferroviários), na construção civil pesada interna (vigas e caibros), na construção civil leve (batentes, forros e lambris), em assoalhos (tacos, tábuas, parquetes e degraus de escada), no mobiliário (móveis de alto padrão com madeira maciça) e em outros usos, como cabos de ferramentas e embarcações (IPT, 2015).

3.5.3.3 Jatobá (*Hymenaea* sp.)

O gênero *Hymenaea*, com várias espécies (*Hymenaea courbaril* L., *Hymenaea intermedia* Ducke, *Hymenaea oblongifolia* Huber, *Hymenaea parvifolia* Huber e *Hymenaea stilbocarpa* Hayne), é encontrado em quase todas as matas nativas do país. A espécie *Hymenaea stilbocarpa* Hayne ocorre desde o estado do Piauí até o Paraná e a espécie *Hymenaea courbaril* L. é mais comum na Amazônia. Como essas madeiras são semelhantes quanto à densidade de massa e caracteres anatômicos, no comércio têm, praticamente, o mesmo valor. Assim, essas madeiras são tratadas em conjunto, sendo mencionada a espécie, quando pertinente.

O Jatobá possui outros nomes populares: copal, courbaril, jataí, jataíba, jatobá curuba, jatobazinho, jutaí, jutaí açu, jutaí do igapó, jutaí grande, jutaí mirim, jutaí vermelho e quebra machado.

Sua ocorrência no Brasil é na Amazônia e na Mata Atlântica, encontrada nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio Grande do Sul, Rondônia e São Paulo. O Jatobá também é encontrado na América Central, Argentina, Bolívia, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Paraguai, Peru e Suriname.

O Jatobá possui densidade aparente (a 15% de umidade) de 960 kg/m³. Algumas características organolépticas de sua madeira: cerne e alburno distintos pela cor, cerne variando do castanho amarelado ao castanho avermelhado, alburno branco amarelado, cheiro e gosto imperceptíveis, densidade alta, dura ao corte, grã regular a irregular, textura média e superfície pouco lustrosa.

A madeira de Jatobá é moderadamente fácil de trabalhar, pode ser aplainada, colada, parafusada e pregada sem problemas. Apresenta resistência para torneiar e faquear. O acabamento é bom. Aceita pintura, verniz e lustre.

Seus principais usos são: na construção civil pesada externa (dormentes ferroviários e cruzetas), na construção civil pesada interna (vigas e caibros), na construção civil leve (portas, janelas, batentes, guarnições, forros e lambris), em assoalhos (tacos, tábuas, parquetes e degraus de escada), no mobiliário (móveis de alto padrão com madeira maciça) e em outros usos, como cabos de ferramentas e peças torneadas para artigos esportivos e brinquedos (IPT, 2015).

3.6 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conteúdo exposto nesta Revisão Bibliográfica permite a constatação das necessidades de políticas nacionais de incentivos (fiscais, econômicos, sociais e ambientais) à reutilização de resíduos. Tal necessidade é evidenciada pelo alto custo que a matéria-prima madeira representa nos processos madeireiros, pelo aumento da demanda de pisos de madeira, pela substituição de madeiras tropicais por outros insumos alternativos e pelos inúmeros estudos com aplicação de materiais residuais. O Brasil apresenta uma produção exorbitante de resíduos lignocelulósicos provenientes da agroindústria, que não possuem destinos e aplicações nobres, onde na maioria dos casos os resíduos não são sequer utilizados.

Ficou evidenciado o ineditismo deste estudo, que envolve a utilização de materiais alternativos na produção de painéis de partículas de alta densidade, com partículas de *Pinus elliottii* (madeira de reflorestamento e resíduo de madeira utilizada para resinagem), casca de aveia (resíduo agroindustrial) e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (de procedência majoritariamente natural e renovável). O adesivo melamina formaldeído é usado em grande escala industrial no Brasil e, apesar de apresentar alguns inconvenientes ambientais (como o formaldeído), também é inédito seu uso com os materiais das partículas empregadas neste estudo.

Até o momento é desconhecido qualquer trabalho na área de produção de painéis de partículas de alta densidade constituídos de partículas de *Pinus elliottii* e casca de aveia, juntamente com as proporções de partículas utilizadas e os tipos e teores de adesivos empregados. Foram consultados diversos bancos de dados e editoras (SCIENCE DIRECT, WEB OF SCIENCE, WEB OF KNOWLEDGE, SCIELO, ELSEVIER, ENGINEERING VILLAGE, SPRINGER etc), e nada foi encontrado análogo à metodologia proposta, tornando este projeto inédito e factível.

O ineditismo deste estudo, como mencionado, também trouxe dificuldades em encontrar estudos semelhantes, no âmbito de utilizar alguns dos materiais, ou algumas condições de produção similares ou mesmo dificuldades de encontrar trabalhos com algumas das propriedades avaliadas, para possíveis comparações dos resultados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção foram apresentados os materiais e a metodologia empregados na produção dos painéis de partículas, além de mencionados a sequência dos ensaios e equipamentos aplicados à caracterização (física, mecânica e para pisos) dos painéis produzidos.

4.1 MATERIAL

Este estudo foi desenvolvido na Universidade de São Paulo (USP), Campus 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) da Universidade de São Paulo (USP).

Na confecção dos painéis de partículas foram utilizados resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e resíduos de casca de aveia (*Avena sativa*). A madeira de *Pinus elliottii* apresentou densidade aparente de 480 kg/m^3 (ALMEIDA, 2014), segundo a norma ABNT NBR 7190:1997. O material casca de aveia apresentou densidade aparente de 290 kg/m^3 , segundo dados fornecidos pela empresa do setor que disponibilizou o material para este estudo.

Os resíduos de madeira de *Pinus elliottii* foram obtidos na cidade de São Carlos, estado de São Paulo. De acordo com informações fornecidas pela empresa que disponibilizou o material, a madeira de *Pinus elliottii* utilizada neste estudo é proveniente de árvores utilizadas para resinagem. A casca de aveia empregada foi obtida de uma indústria do setor, localizada na cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul.

Para estabelecer a adesão entre as partículas, foram utilizados dois tipos de adesivos: poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído.

Foi adotado o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona devido ao seu bom desempenho obtido em estudos anteriores, desenvolvidos no LaMEM/SET, com painéis de madeira (BERTOLINI et al., 2014; CAMPOS, 2005; DIAS, 2005; NASCIMENTO, 2003), além de ser um adesivo de procedência majoritariamente natural e renovável.

Foi adotado o adesivo melamina formaldeído por este ser largamente empregada em indústrias de painéis à base de madeira no Brasil, apesar de seu emprego ser controlado e

questionável em países com rigoroso controle ambiental pelo fato deste emitir formaldeído, substância indesejável e prejudicial à saúde humana (PETERSON, 1964; SAMLAIC, 1983).

O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona utilizado é do tipo bicomponente, na proporção 1:1 entre pré-polímero e polioli, com teor de sólidos de 100%. A proporção 1:1 foi empregada devido ao adequado desempenho alcançado por pesquisadores do LaMEM/SET com estudos utilizando esta proporção. Um dos componentes (polioli) é derivado de óleo vegetal, com densidade de $1,10 \text{ g/cm}^3$ e o outro componente (pré-polímero) é o isocianato polifuncional, com densidade de $1,24 \text{ g/cm}^3$, ambos fornecidos pela Plural Indústria Química, localizada na cidade de São Carlos, estado de São Paulo.

O adesivo melamina formaldeído (MF) utilizado foi fornecido pela empresa Si Group Crios Resinas S.A., localizada na cidade de Rio Claro, estado de São Paulo. Tal adesivo apresenta as seguintes características físico-químicas: pH a 25°C de 8,48; teor de sólidos 3H a 105°C de 71,28%; densidade a 25°C de $1,26 \text{ g/cm}^3$; viscosidade Brookfield a 25°C de 756 centipoises e formol livre igual a 0,19%. Empregou-se o adesivo MF por ser muito utilizado industrialmente. As partículas e os adesivos utilizados neste estudo são apresentados na Figura 1.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 1 - Partículas de madeira de *Pinus elliottii* (a), partículas de casca de aveia (b), adesivo poliuretano à base de mamona (c) e adesivo melamina formaldeído (d).

4.2 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS EM LABORATÓRIO

A produção dos painéis de partículas em laboratório foi dividida em três etapas: geração e caracterização das partículas; estudos preliminares e delineamento experimental; e confecção dos painéis.

4.2.1 Produção e caracterização das partículas

Os resíduos da madeira de *Pinus elliottii* e de casca de aveia (Figuras 1a e 1b, respectivamente) foram picados e transformados em partículas, como descrito a seguir.

4.2.1.1 Geração das partículas

As partículas de *Pinus elliottii* e de casca de aveia foram geradas a partir do processamento dos resíduos, obtidos num moinho de facas do tipo Willye, da marca Marconi, modelo MA 680, utilizando-se peneira de 2,8 milímetros de abertura para obtenção das partículas.

Adotaram-se tais dimensões para as partículas por estas apresentarem desempenho adequado dos painéis produzidos no LaMEM/SET (BERTOLINI, 2014; NASCIMENTO, 2003; VARANDA et al., 2012).

As partículas produzidas foram aproveitadas em sua totalidade, ou seja, os “finos” também foram utilizados na confecção dos painéis. Os “finos” quando empregados em pequena quantidade, conferem melhor adesão entre as partículas e o adesivo e, conseqüentemente, proporcionam melhores propriedades aos painéis.

4.2.1.2 Determinação das propriedades das partículas

4.2.1.2.1 Teor de umidade

Após a geração das partículas, foi determinado o teor de umidade, dispondo as amostras (em triplicata) dos dois materiais em estufa, à temperatura de $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, e realizando as pesagens até a obtenção de massa constante. A estufa com circulação de ar utilizada é da marca Marconi, modelo MA 035. A balança eletrônica digital utilizada é da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas. O teor de umidade das partículas é calculado pela Equação 1, em atendimento ao que prescreve o documento normativo da ABNT NBR 14810:2013.

$$U = ((MU-MS)/MS) \times 100 \quad (1)$$

onde:

U é o teor de umidade das partículas, expresso em porcentagem (%);

MU é a massa úmida das partículas, expressa em gramas (g);

MS é a massa seca das partículas, expressa em gramas (g).

4.2.1.2.2 Análise granulométrica

Foi realizada análise granulométrica das partículas de *Pinus elliottii* e de casca de aveia. Foi utilizado o equipamento SOLOTEST (Figura 2), empregando peneiras com granulometrias que atendem as especificações da norma ASTM, correspondentes a 7, 10, 16, 30, 40 e 50 mesh.

A partir da geração das partículas, retirou-se uma amostra de 200 gramas, para cada um dos dois materiais. Tais amostras foram submetidas à vibração, por tempo de dez minutos, e velocidade de vibração 5, permitindo que o material atravessasse as peneiras em ordem

decrecente de abertura. Foram realizadas três repetições para cada um dos dois materiais. As partículas passantes na peneira de 50 mesh (peneira com menor abertura) foram consideradas como “finos”.

A balança utilizada é da marca Marconi, modelo AS 5000C, com sensibilidade de 0,1 gramas. O equipamento de vibração utilizado na análise granulométrica é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Equipamento SOLOTEST de vibração utilizado na análise granulométrica.

4.2.2 Estudos preliminares e delineamento experimental

Antes da confecção dos painéis definitivos, foram procedidos estudos preliminares, divididos em três etapas.

Nas três etapas foram adotados os seguintes parâmetros:

- proporção de partículas: 50% da massa total do painel com partículas de *Pinus elliottii* e 50% da massa total do painel com partículas de casca de aveia;
- parâmetros de prensagem: pressão de 4 MPa e tempo de dez minutos;
- faixa de densidade dos painéis: de 850 a 950 kg/m³. Acima de 800 kg/m³ é painel de alta densidade (IWAKIRI, 2005);
- dimensões nominais dos painéis: 280 x 280 x 10 milímetros.

O primeiro estudo preliminar (etapa I) foi realizado para se determinar a temperatura ideal de prensagem do adesivo melamina formaldeído. Esta necessidade se deu devido a literatura afirmar que a temperatura de prensagem deste adesivo é em torno de 150°C. Porém,

era desconhecido o comportamento e a compatibilidade deste adesivo com as partículas em estudo. A Tabela 1 apresenta a definição dos parâmetros para os testes preliminares iniciais.

Tabela 1 - Definição da temperatura de prensagem do adesivo melamina formaldeído.

Etapas	Teor e tipo de adesivo	Temperatura de prensagem (°C)	Painéis produzidos	Propriedade avaliada	Número de amostras
I	13% de melamina formaldeído	140	1	MOR	4
				I 2h	4
		150	1	MOR	4
				I 2h	4
		160	1	MOR	4
				I 2h	4
		170	1	MOR	4
				I 2h	4
		180	1	MOR	4
				I 2h	4

onde: MOR = módulo de ruptura na flexão estática e I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas.

Como a norma ABNT NBR 14810:2013 menciona que o teor de adesivo a ser utilizado deve ser em torno de 12% em relação à massa das partículas, foram realizados testes preliminares com 11, 13 e 15% de adesivo. As etapas II e III são referentes aos estudos preliminares com os adesivos melamina formaldeído e poliuretano à base de óleo de mamona, respectivamente.

Nas etapas II e III foram adotados os seguintes parâmetros de prensagem:

- pressão de 4 MPa, tempo de dez minutos e temperaturas de 100°C para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona e 160°C para o adesivo melamina formaldeído (definido na etapa I dos testes preliminares).

Como o adesivo melamina formaldeído é à base de água, quando prensado libera muitos gases que podem ocasionar “explosões” e a consequente perda do painel (IWAKIRI, 2005). Por estas razões, o ciclo de prensagem dos painéis produzidos com este adesivo (tanto preliminares, quanto definitivos) foi realizado com três alívios de pressão, sendo estes aos 2, 4 e aos 6 minutos de prensagem, para liberação dos gases gerados.

Como pode ser observado na Tabela 2, nas etapas II e III dos estudos preliminares foram produzidos seis painéis. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de produção e avaliação dos painéis produzidos nas fases II e III.

Nos estudos preliminares, foram produzidos onze painéis de partículas. Diante dos

resultados obtidos nesta fase, foi estabelecido o delineamento experimental empregado na produção dos painéis, com a combinação dos fatores e dos níveis adotados.

Tabela 2 - Parâmetros de produção e avaliação dos painéis preliminares.

Etapa	Adesivo	Teor de adesivo	Painéis produzidos	Propriedade avaliada	Número de amostras
II	Melamina formaldeído	11%	1	MOR	4
				I 2h	4
		13%	1	MOR	4
				I 2h	4
		15%	1	MOR	4
				I 2h	4
III	Poliuretano à base de óleo de mamona	11%	1	MOR	4
				I 2h	4
		13%	1	MOR	4
				I 2h	4
		15%	1	MOR	4
				I 2h	4

onde: MOR = módulo de ruptura na flexão estática e I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas.

O primeiro fator investigado é a fração mássica das partículas de casca de aveia (%CA), sendo os cinco níveis 0, 25, 50, 75 e 100%, em relação à massa de partículas de resíduos de madeira de *Pinus elliottii*. O segundo fator estudado é o teor de adesivo empregado, em relação à massa de partículas (%Ades.), com dois níveis estudados, sendo 11 e 13%. Por fim, o terceiro fator investigado é o tipo de adesivo utilizado (TA), com dois níveis avaliados: adesivos melamina formaldeído (MF) e poliuretano à base de óleo de mamona (PU).

O delineamento experimental adotado originou vinte tratamentos (Tr), como mostra a Tabela 3.

Para cada um dos vinte tratamentos (Tr) foram produzidos cinco painéis de partículas idênticos (VARANDA, 2012), totalizando 100 painéis de partículas. Os painéis produzidos possuem dimensões nominais de 280 x 280 x 10 milímetros.

Tabela 3 - Delineamento experimental adotado.

Tratamentos (Tr)	%CA	%Ades.	TA
Tr1	0	11	MF
Tr2	0	11	PU
Tr3	0	13	MF
Tr4	0	13	PU
Tr5	25	11	MF
Tr6	25	11	PU
Tr7	25	13	MF
Tr8	25	13	PU
Tr9	50	11	MF
Tr10	50	11	PU
Tr11	50	13	MF
Tr12	50	13	PU
Tr13	75	11	MF
Tr14	75	11	PU
Tr15	75	13	MF
Tr16	75	13	PU
Tr17	100	11	MF
Tr18	100	11	PU
Tr19	100	13	MF
Tr20	100	13	PU

onde: Tr = tratamento; %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído e PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

4.2.3 Confeção dos painéis

Definido o delineamento experimental com os vinte tratamentos (planejamento I) como apresentado na Tabela 3, foram confeccionados em laboratório os painéis de partículas (tanto para os estudos preliminares quanto para os estudos definitivos) a partir das partículas de *Pinus elliottii* e de casca de aveia (*Avena sativa*) nas dimensões desejadas.

4.2.3.1 Preparação e aplicação da resina

O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona utilizado é do tipo bicomponente e foi preparado e utilizado na proporção 1:1 entre pré-polímero (isocianato polifuncional) e poliol (derivado do óleo vegetal).

O adesivo melamina formaldeído (MF) teve adição de 1,5% de sulfato de amônia (em relação à massa do adesivo). O sulfato de amônia tem a função catalisadora, isto é, acelerar o processo de cura do adesivo. Optou-se por não utilizar a parafina devido ao adesivo MF apresentar boa resistência a umidade.

As partículas de *Pinus elliottii* e de casca de aveia geradas no processamento dos resíduos, juntamente com o adesivo, foram pesados nas quantidades estipuladas e adicionados na encoladeira, para mistura e homogeneização do adesivo com as partículas. A balança eletrônica digital utilizada é da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas. Em cada painel foram utilizados 705 gramas de partículas aglutinadas com o adesivo, nas proporções 11 e 13% em relação à massa das partículas. A quantidade de partículas utilizadas em cada painel (705 gramas) foi definida a partir da faixa de densidade (de 850 a 950 kg/m³) e do volume adotado para os painéis (dimensões nominais de 280 x 280 x 10 milímetros).

Cada mistura ficou na encoladeira por cinco minutos, no mínimo. A encoladeira utilizada é da marca Lieme, modelo BP-12 SL, como mostra a Figura 3.

(a)

(b)

Figura 3 - Encoladeira utilizada (a) e misturador das partículas com o adesivo (b).

4.2.3.2 Pré-prensagem e prensagem

Após a completa homogeneização do adesivo com as partículas, a mistura foi submetida à pré-prensagem, para formação do “colchão” de partículas. Este recebeu uma força de 1 kN, equivalente a uma pressão de 0,013 MPa. A pré-prensagem do painel foi realizada por prensa mecânica manual, de fabricação própria, como mostra a Figura 4.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4 - Molde de pré-prensagem (a), molde com partículas e adesivo (b), pré-prensagem (c) e “colchão” de partículas pré-conformado (d).

Em seguida, o “colchão” de partículas (já pré-conformado) com espessura na faixa de 2 a 3 centímetros (Figura 5d) seguiu para a prensa. A prensagem dos painéis foi realizada em prensa semiautomática da marca Marconi, modelo MA 098/50, com capacidade de 800 kN e temperatura máxima de 200°C.

As condições de prensagem empregadas neste estudo foram: tempo de dez minutos,

pressão de 4 MPa e temperaturas de 100°C para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona e 160°C para o adesivo melamina formaldeído.

Após a prensagem, todos os painéis produzidos ficaram acondicionados por 72 horas, no mínimo, objetivando a estabilização e a cura completa do adesivo. A prensa utilizada é apresentada na Figura 5.

(a)

(b)

(c)

Figura 5 - Prensa (a), painel sendo prensado (b) e painel após prensagem (c).

4.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA – PLANEJAMENTO I

Após o período de acondicionamento, os painéis foram submetidos ao esquadrejamento e posterior seccionamento para retirada dos corpos de prova.

Inicialmente foi retirado cerca de 10 milímetros de cada extremidade do painel, em uma serra circular esquadrejadeira (Figura 6a). Os painéis passaram a ter dimensões nominais

de 260 x 260 x 10 milímetros (Figura 6b). A partir do esquadrejamento, os painéis foram seccionados nas dimensões dos corpos de prova.

Para o esquadrejamento dos painéis foi utilizada uma serra circular esquadrejadeira da marca Invicta, modelo SCI-160. Para o seccionamento dos painéis e obtenção dos corpos de prova foi utilizada uma serra circular da marca Marajó, modelo KSN 7945.

(a)

(b)

(c)

Figura 6 - Esquadrejamento (a), painéis esquadrejados (b) e parte dos corpos de prova de flexão (c).

Os corpos de prova foram retirados dos painéis produzidos de acordo com o esquema da Figura 7. Foi adotado esse esquema de retirada dos corpos de prova para facilitar as etapas de corte (objetivando reduzir o número de operações de corte do painel), realizados na serra circular esquadrejadeira.

Figura 7 - Esquema de retirada dos corpos de prova para o planejamento I. O desenho acima esta fora de escala com dimensões em milímetros.

As siglas utilizadas no esquema da Figura 7 para designar as propriedades físico-mecânicas avaliadas no planejamento I, são apresentadas na Tabela 4, juntamente com as dimensões dos corpos de prova e a norma referente ao ensaio realizado.

De cada painel foi retirado um corpo de prova para cada uma das propriedades físico-mecânicas descritas na Figura 7, exceto para a propriedade física teor de umidade (TU). Para esta propriedade foi retirado um corpo de prova de cada um dos dez painéis selecionados aleatoriamente, dentre os 100 painéis produzidos, apenas para verificar o teor de umidade médio dos painéis avaliados, totalizando dez corpos de prova para a propriedade física teor de umidade.

Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios do planejamento I.

Ensaio	Sigla adotada	Dimensões dos corpos de prova (mm)		Norma ABNT NBR 14810:
		Comprimento	Largura	
Flexão estática	FE	250	50	2013
Tração perpendicular	TP	50	50	2013
Densidade	D	50	50	2013
Teor de umidade	TU	50	50	2013
Inchamento em espessura	I	25	25	2006
Absorção de água	A	25	25	2006
Arrancamento de parafuso – face	AP _F	150	75	2006
Arrancamento de parafuso – topo	AP _T	115	65	2006

4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS PAINÉIS

Toda a caracterização físico-mecânica dos painéis produzidos (Planejamento I – 20 tratamentos) foi realizada de acordo com as normas ABNT NBR 14810:2006 e ABNT NBR 14810:2013.

Este estudo iniciou-se em julho de 2012 e a nova versão da norma ABNT NBR 14810 foi publicada em dezembro de 2013 e com validade a partir de janeiro de 2014. Nesse período, parte dos ensaios físicos foi realizado seguindo a norma em vigor na época, ou seja, a ABNT NBR 14810:2006.

4.4.1 Propriedades físicas avaliadas

A seguir, são apresentadas as metodologias utilizadas para a determinação das propriedades físicas avaliadas.

4.4.1.1 Teor de umidade

Os corpos de prova para os ensaios do teor de umidade dos painéis têm dimensões nominais de 50 x 50 milímetros (Tabela 4). As amostras foram inicialmente pesadas em balança eletrônica digital da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas, para obtenção da massa úmida.

Em seguida os corpos de prova foram levados à estufa com circulação de ar, fabricação Marconi, modelo MA 035 a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, onde foram pesados até atingirem massa constante. Daí foi obtida a massa seca dos corpos de prova.

O teor de umidade dos painéis foi calculado de acordo com a Equação 1, a mesma utilizada para o cálculo do teor de umidade das partículas, mudando apenas a amostra, isto é, anteriormente são partículas e aqui são painéis de partículas.

A propriedade física teor de umidade dos painéis de partículas foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 14810:2013.

4.4.1.2 Densidade

Os corpos de prova para os ensaios da densidade dos painéis têm dimensões nominais de 50 x 50 milímetros (Tabela 4). A densidade dos painéis foi determinada diretamente pela relação massa/volume. Para determinação da massa dos corpos de prova foi utilizada uma balança eletrônica digital da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas. Para determinação do volume dos corpos de prova foi utilizado um paquímetro digital da marca Starrett, modelo 799, com sensibilidade de 0,01 milímetros.

A densidade determinada para os painéis foi a densidade aparente, ou seja, a densidade (massa e volume) tomados de acordo com a umidade de equilíbrio dos painéis produzidos com o ambiente local.

A propriedade física densidade dos painéis de partículas foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 14810:2013. A Figura 8 apresenta os equipamentos utilizados na determinação da densidade.

Figura 8 - Ensaio para determinação da densidade dos painéis: balança analítica (a), paquímetro digital (b) e corpos de prova (c).

4.4.1.3 Razão de compactação

A razão de compactação é definida pela relação da densidade do painel pela densidade da madeira que originou as partículas.

No caso deste estudo, a razão de compactação foi definida pela relação da densidade do painel pela densidade do (s) material (is) de origem das partículas, ou seja, a densidade das partículas de madeira de *Pinus elliottii* e/ou a densidade das partículas de casca de aveia, em função do referido tratamento (Tr), conforme a Tabela 3.

Nos cálculos para a determinação da razão de compactação, a densidade aparente adotada para a madeira de *Pinus elliottii* foi de $0,48 \text{ g/cm}^3$ ou 480 kg/m^3 (ALMEIDA, 2014).

No caso da densidade aparente da casca de aveia foi adotado o valor de $0,29 \text{ g/cm}^3$ ou

290 kg/m³, de acordo com os dados fornecidos pela empresa que disponibilizou tal material para a realização deste estudo.

4.4.1.4 Inchamento em espessura e absorção de água

Os corpos de prova referente aos ensaios tanto de inchamento em espessura quanto de absorção de água possuíam dimensões nominais de 25 x 25 milímetros (Tabela 4).

Para a avaliação destas propriedades, os corpos de prova foram avaliados em relação à espessura (para a propriedade inchamento em espessura) e em relação à massa (para a propriedade absorção de água), antes e após a imersão em água a 20°C, para os períodos de duas e vinte e quatro horas.

Para determinação da espessura dos corpos de prova foi utilizado paquímetro digital da marca Starrett, modelo 799, com sensibilidade de 0,01 milímetros. Para determinação da massa dos corpos de prova foi utilizada uma balança eletrônica digital da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas.

Para o cálculo do inchamento em espessura foi utilizada a Equação 2.

$$I = ((E1-E0)/E0) \times 100 \quad (2)$$

onde:

I é o inchamento em espessura do corpo de prova, expresso em porcentagem (%);

E1 é a espessura do corpo de prova após o período de imersão, expressa em milímetros (mm);

EO é a espessura do corpo de prova antes da imersão, expressa em milímetros (mm).

Para o cálculo da absorção de água foi utilizado a Equação 3.

$$A = ((M1-M0)/M0) \times 100 \quad (3)$$

onde:

A é a absorção de água, expressa em porcentagem (%);

M1 é a massa do corpo de prova após imersão, expressa em gramas (g);

MO é a massa do corpo de prova antes da imersão, expressa em gramas (g).

As propriedades físicas inchamento em espessura e absorção de água, para os períodos de duas e vinte e quatro horas, foram determinadas de acordo com a norma ABNT NBR 14810:2006.

Os corpos de prova de inchamento em espessura e absorção de água são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Corpos de prova de inchamento em espessura e absorção de água.

4.4.2 Propriedades mecânicas avaliadas

A seguir, são apresentadas as metodologias utilizadas para a determinação das propriedades mecânicas avaliadas.

Todos os ensaios para caracterização mecânica dos painéis foram realizados em máquina universal de ensaios da AMSLER, com capacidade de 250 kN.

4.4.2.1 Módulo de elasticidade e módulo de ruptura

Os corpos de prova de flexão estática devem apresentar as seguintes dimensões nominais: (comprimento de 20 vezes a espessura do painel mais 50), em milímetros, e largura de 50 milímetros (Tabela 4). Como neste estudo os painéis possuíam espessura nominal de dez milímetros, as dimensões nominais dos corpos de prova para os ensaios de flexão estática

foram 250 x 50 milímetros.

Nos ensaios de flexão estática foram determinados o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), ou rigidez e resistência dos painéis na flexão estática, respectivamente.

O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com a Equação 4.

$$MOE = ((P1xD^3)/(dx4xBxE^3)) \quad (4)$$

onde:

MOE é o módulo de elasticidade, expresso em Newtons por milímetro quadrado (N/mm²) ou Megapascal (MPa). Sabe-se que 1 N/mm² = 1 MPa;

P1 é a carga no limite proporcional lida no indicador de cargas, expressa em Newtons (N);

D é a distância entre os apoios do aparelho, expressa em milímetros (mm);

d é a deflexão correspondente à carga P1, expressa em milímetros (mm);

B é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

E é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

O módulo de ruptura foi determinado de acordo com a Equação 5.

$$MOR = ((1,5xPx D)/(BxE^2)) \quad (5)$$

onde:

MOR é o módulo de resistência à flexão estática, expresso em Newtons por milímetro quadrado (N/mm²) ou megapascal (MPa);

P é a carga de ruptura lida no indicador de cargas, expressa em Newtons (N);

D é a distância entre apoios do aparelho, expressa em milímetros (mm);

B é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

E é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

As propriedades mecânicas módulo de elasticidade e módulo de ruptura na flexão estática foram determinadas de acordo com a norma ABNT NBR 14810:2013. O ensaio de flexão estática é apresentado na Figura 10a.

4.4.2.2 Tração perpendicular

Os corpos de prova de tração perpendicular (ou adesão interna) possuem dimensões nominais de 50 x 50 milímetros (Tabela 4). A resistência à tração perpendicular (TP) dos corpos de prova foi determinada de acordo com a Equação 6.

$$TP = P/S \quad (6)$$

Sendo: $S = b_1 \times b_2$

onde

TP é a resistência à tração perpendicular, expressa em newtons por milímetro quadrado (N/mm^2) ou megapascal (MPa);

P é a carga na ruptura, expressa em newtons (N);

S é a área da superfície do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

$b_1 \times b_2$ são as dimensões do corpo de prova, expressas em milímetros (mm).

A propriedade mecânica resistência à tração perpendicular (TP) foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 14810:2013. O ensaio de tração perpendicular é apresentado na Figura 10b.

(a)

(b)

Figura 10 - Ensaio de flexão estática (a) e ensaio de resistência à tração perpendicular (b).

Para aderir os corpos de prova aos suportes de aço para a execução dos ensaios de

resistência à tração perpendicular, foi utilizada cola Epóxi Araldite 24 horas, bicomponente, na proporção 1:1 entre resina e endurecedor, conforme indicação do fabricante.

Foi utilizada a cola Epóxi Araldite 24 horas para garantir que a ruptura fosse no corpo de prova, afim de evitar rupturas na linha de cola (entre o corpo de prova e o suporte de aço do ensaio) e, conseqüentemente, a perda do ensaio.

4.4.2.3 Arrancamento de parafuso

Os corpos de prova para a determinação da resistência ao arrancamento de parafuso apresentaram dimensões nominais de 150 x 75 milímetros para face (ou superfície) e 115 x 65 milímetros para topo (Tabela 4).

O furo para a fixação do parafuso foi realizado em furadeira de bancada da marca Helmo (Figura 11a). A fixação dos parafusos se deu com uma parafusadeira da marca Bosch, modelo GSR 10,8-2-LI Professional (Figura 11b).

A furação e a fixação dos parafusos nos corpos de prova, assim como a determinação da propriedade mecânica resistência ao arrancamento de parafuso (face e topo) foram realizadas de acordo com a norma ABNT NBR 14810:2006.

Figura 11 - Furadeira de bancada (a), parafusadeira fixando o parafuso (b), ensaios de arrancamento de parafuso: face (c) e topo (d).

A leitura da força necessária para arrancar o parafuso foi realizada no indicador da máquina universal, expressa em Newtons (N). Os ensaios de arrancamento de parafuso, para face e topo, foram apresentados nas Figuras 11c e 11d, respectivamente.

4.5 ENSAIOS PARA PISOS – PLANEJAMENTO II

Nesta subseção foram descritos os ensaios realizados em parte dos painéis produzidos (planejamento II – 12 tratamentos) e nas três espécies de madeira tropical brasileiras: Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Jatobá (*Hymenaea* sp.).

Deve-se salientar que os ensaios para pisos, constantes das diversas normas nacionais e internacionais, que dizem respeito à abrasão, ao impacto, à resistência ao risco, à aderência, ao brilho, a substâncias manchadoras, entre outros, são propostos para avaliar o desempenho dos revestimentos dos pisos de madeira (tanto maciços quanto engenheirados). Os ensaios

para pisos avaliados neste estudo (abrasão, dureza Janka, impacto Charpy, rugosidade superficial e porosimetria por intrusão de mercúrio) foram realizados nos pisos sem revestimento. Isso foi efetuado com o objetivo de se comprovar a equivalência dos materiais utilizados (madeiras tropicais e painéis produzidos), quanto a seus desempenhos como piso na forma crua, sem revestimentos.

Esta comparação é fundamentada na ideia de se propor uma alternativa quanto à matéria-prima utilizada no setor de pisos de madeira. Atualmente, a maioria dos pisos de madeira é proveniente de espécies de madeiras tropicais.

A partir deste contexto, faz-se necessário o estudo da aplicação de insumos alternativos na produção de pisos, tanto para reduzir a demanda por essências tropicais quanto para suprir o aumento da demanda de matéria-prima pelas indústrias deste segmento.

4.5.1 Delineamento experimental - planejamento II

Nesta subseção é apresentado o delineamento experimental realizado para a caracterização dos ensaios para pisos (planejamento II – 12 tratamentos).

O delineamento experimental realizado para a caracterização físico-mecânica dos painéis, apresentado na Tabela 3, originou vinte tratamentos (planejamento I). Como os painéis produzidos com 75 e 100% de fração mássica das partículas de casca de aveia (tratamentos 13 ao 20, Tabela 3) não apresentaram desempenho físico-mecânico satisfatório, foram descartados desta segunda etapa do estudo.

Portanto, o delineamento experimental adotado na caracterização para pisos (planejamento II) envolveu doze tratamentos (Tr), como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Delineamento experimental do planejamento II.

Tratamentos (Tr)	%CA	%Ades.	TA
Tr1	0	11	MF
Tr2	0	11	PU
Tr3	0	13	MF
Tr4	0	13	PU
Tr5	25	11	MF
Tr6	25	11	PU
Tr7	25	13	MF
Tr8	25	13	PU
Tr9	50	11	MF
Tr10	50	11	PU
Tr11	50	13	MF
Tr12	50	13	PU

onde: Tr = tratamento; %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído e PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Neste planejamento com doze tratamentos não foram produzidos painéis de partículas. Os corpos de prova para os ensaios para pisos foram retirados dos painéis produzidos inicialmente. Deve ser lembrado que os painéis referentes aos tratamentos 13 ao 20 foram descartados para estes ensaios (planejamento II).

4.5.2 Obtenção dos corpos de prova – planejamento II

O esquadreamento dos painéis do planejamento II (doze tratamentos) foi realizado na obtenção dos corpos de prova para o planejamento I, descrito na subseção 4.3.

Os corpos de prova do planejamento II foram retirados dos painéis produzidos de acordo com o esquema da Figura 12.

Figura 12 - Esquema de retirada dos corpos de prova dos painéis para o planejamento II. O desenho acima está fora de escala com dimensões em milímetros.

As siglas utilizadas no esquema da Figura 12, para designar as propriedades avaliadas no planejamento II, foram apresentadas na Tabela 6, juntamente com as dimensões dos corpos de prova e a(s) norma(s) referente(s) ao ensaio realizado.

De cada painel foi retirado um corpo de prova para cada uma das propriedades avaliadas, descritas na Figura 12.

Tabela 6 - Dimensões dos corpos de prova para os ensaios do planejamento II.

Ensaio	Sigla adotada	Dimensões dos corpos de prova (mm)		Normas utilizadas
		Comprimento	Largura	
Abrasão	Ab	100	100	I e II
Dureza Janka	DJ	150	75	III e IV
Impacto Charpy	IC	55	10 x 10	V
Rugosidade superficial	RS	150	75	VI e VII
PIM	PIM	23	14	-

onde: PIM = porosimetria por intrusão de mercúrio; I = ABNT NBR 14833-1:2014; II = ABNT NBR 14535:2008; III = ASTM D1037:1999; IV = ANSI A208.1:1999; V = ASTM E23:2012; VI = ABNT NBR ISO 4287:2002 e VII = ABNT NBR 8404:1984.

4.5.3 Determinação das propriedades das madeiras tropicais

As três espécies de madeiras tropicais brasileiras, Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Jatobá (*Hymenaea* sp.), foram adquiridas em uma empresa da cidade de Brotas, estado de São Paulo.

Inicialmente, as peças se encontravam no formato de tábuas, com dimensões nominais de 150 x 13 x 2 centímetros.

4.5.3.1 Teor de umidade

Foram retirados os corpos de prova das madeiras tropicais com as seguintes dimensões nominais: seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2 x 3 centímetros e comprimento, ao longo das fibras, de 5 centímetros, de acordo com a ABNT NBR 7190:1997.

Foi determinado o teor de umidade das peças levadas à estufa, a temperatura de 103±2°C, pesando-se as amostras até obter-se massa constante. A estufa com circulação de ar utilizada é da marca Marconi, modelo MA 035. A balança eletrônica digital utilizada é da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas. O teor de umidade das madeiras foi calculado pela Equação 7, como descreve o documento normativo da ABNT NBR 7190:1997.

$$U = ((M_i - M_s) / M_s) \times 100 \quad (7)$$

onde:

U é o teor de umidade da madeira, expresso em porcentagem (%);

M_i é a massa inicial da madeira, expressa em gramas (g);

M_s é a massa da madeira seca, expressa em gramas (g).

4.5.3.2 Densidade

Os corpos de prova retirados das tábuas de madeira para determinação da densidade apresentaram as mesmas dimensões nominais descritas anteriormente, para determinação do teor de umidade das amostras.

A densidade determinada para as três espécies de madeiras tropicais foi a densidade aparente, definida pela Equação 8, como estabelece a norma ABNT NBR 7190:1997

$$D_{ap} = (m_{12}/V_{12}) \quad (8)$$

onde:

D_{ap} é a densidade aparente a 12% de umidade, expressa em quilogramas por metros cúbicos (kg/m^3);

m_{12} é a massa da madeira a 12% de umidade, expressa em quilogramas (kg);

V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade, expresso em metros cúbicos (m^3).

Para determinação da massa dos corpos de prova foi utilizada balança eletrônica digital da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas. Para determinação do volume dos corpos de prova foi utilizado um paquímetro digital da marca Starrett, modelo 799, com sensibilidade de 0,01 milímetros.

4.5.3.3 Confecção dos corpos de prova das madeiras tropicais

Primeiramente foi determinado o teor de umidade destas madeiras (já descrito), para certificar-se que encontravam em equilíbrio com a umidade ambiente. Depois de constatada esta situação (para a cidade de São Carlos, estado de São Paulo por volta de 12% de umidade), estas foram submetidas ao processo de aplainamento e desengrosso. Esta constatação foi necessária para evitar movimentações dimensionais das madeiras após os processos de usinagem (aplainamento e desengrosso), caso tais madeiras não estivessem em equilíbrio com a umidade do ambiente.

Para o aplainamento de uma das faces das tábuas, das três espécies de madeira, foi utilizada plaina da marca Invicta, como mostra a Figura 13a. Após o aplainamento, as tábuas foram submetidas ao processo de desgrosso, para ajustes nas demais faces. A desgrossadeira utilizada é da marca Invicta, como mostra a Figura 13b.

(a)

(b)

(c)

Figura 13 - Plaina utilizada (a), desgrossadeira (b) e tábuas das madeiras após os processos de aplainamento e desgrosso (c).

Após o processo de usinagem (aplainamento e desgrosso), as tábuas passaram a ter dimensões nominais de 150 x 12 x 1 centímetros, como apresentado nas Figuras 13c e 14, espessura análoga à média dos painéis produzidos.

Os corpos de prova das madeiras tropicais para os ensaios em pisos foram confeccionados de acordo com o esquema da Figura 14.

Figura 14 - Esquema de retirada dos corpos de prova das madeiras tropicais para o planejamento II. O desenho acima esta fora de escala com dimensões em milímetros.

As siglas utilizadas no esquema da Figura 14, para designar as propriedades das madeiras tropicais avaliadas no planejamento II, foram apresentadas na Tabela 6, juntamente com as dimensões dos corpos de prova e a norma referente ao ensaio realizado.

Para cada uma das três espécies de madeira tropical avaliadas, foram retirados cinco corpos de prova para cada uma das propriedades avaliadas: abrasão (Ab), dureza Janka (DJ), impacto Charpy (IC) e rugosidade superficial (RS). Exceto para as propriedades físicas teor de umidade (TU) e densidade (D), para as quais foram retirados três corpos de prova por espécie. Para a análise de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) foi retirado um corpo de prova de cada espécie, como mostra o esquema da Figura 14.

4.5.4 Propriedades para pisos

4.5.4.1 Abrasão

Este ensaio mecânico determina a resistência quanto às classes de abrasão e classifica os pisos quanto ao nível de uso. Os corpos de prova para o ensaio mecânico de abrasão possuem dimensões nominais de 100 x 100 milímetros, como estabelecido pela norma ABNT

NBR 14833-1:2014.

O equipamento utilizado neste ensaio é da marca Taber, modelo 5135 Abraser. Os rebolos abrasivos utilizados são do tipo CS-10, com carga de 500 gramas em cada braço de sustentação dos rebolos.

De acordo com a norma ABNT NBR 14535:2008, no ensaio de resistência à abrasão os resultados podem ser expressos de três maneiras distintas: em termos da taxa de desgaste, perda de massa e número de ciclos de desgaste.

A taxa de desgaste é expressa em perda de massa (miligramas) por 100 ciclos. A equação para este cálculo encontra-se na norma ABNT NBR 14535:2008. A perda de massa é calculada obtendo-se a massa do corpo de prova perdida com o desgaste causado pelos rebolos abrasivos. Esta perda de massa é expressa em miligramas em função de um determinado número específico de ciclos.

A terceira maneira de expressão dos resultados do ensaio de resistência à abrasão é o número de ciclos de desgaste, a partir dos quais se determinam dois parâmetros: (a) o número de ciclos de abrasão requerido para atingir o substrato do piso e (b), o número de ciclos de abrasão requerido para remover completamente o filme (ABNT NBR 14535:2008).

Para este estudo, os resultados do ensaio de resistência à abrasão (Ab) foram expressos em função da perda de massa na abrasão. Esta perda de massa foi expressa em miligramas (mg), e o número específico de ciclos adotado foi 4200.

Esta escolha foi fundamentada em duas justificativas. Primeiro, porque se objetivou atingir a classe de abrasão AC4, com número de ciclos superior a 4000, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação do piso quanto à resistência à abrasão.				
Classe de abrasão	AC2	AC3	AC4	AC5
Número de ciclos	≥ 1500	≥ 2000	≥ 4000	≥ 6000

Fonte: ABNT NBR 14833-1:2014, p. 30.

Esta classe de abrasão foi adotada devido ao bom desempenho mecânico destes painéis, determinado na caracterização mecânica realizada no planejamento I.

Ainda segundo a norma ABNT NBR 14833-1:2014, os pisos podem ser classificados quanto ao nível de uso, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação do piso quanto ao nível de uso.

Nível de uso	Doméstico			Comercial		
Tráfego	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
Resistência à abrasão	AC2		AC3	AC4	AC5	

Fonte: ABNT NBR 14833-1:2014, p. 5.

Foi estabelecido atingir a classe de abrasão AC4, justamente pelo bom desempenho físico-mecânico alcançado pela maior parte dos tratamentos adotados no delineamento experimental do planejamento I. Esse bom desempenho levou à melhor eficiência de aplicação de tais painéis em ambientes com maiores solicitações (comercial) e tráfego com intensidade média, conforme a Tabela 8.

Outra justificativa para adotar 4200 ciclos é a necessidade de se examinar o corpo de prova quanto ao desgaste à abrasão a cada 300 ciclos, sendo 4200 um múltiplo de 300 (300×14). A cada 300 ciclos de abrasão foi realizada aferição da massa do corpo de prova.

Para determinação da massa dos corpos de prova foi utilizada uma balança eletrônica digital da marca Ohaus, modelo ARD 110, com sensibilidade de 0,001 gramas. O ensaio de abrasão é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de abrasão.

4.5.4.2 Dureza Janka

Este ensaio mecânico que utiliza uma semiesfera de aço a ser penetrada no corpo de prova é realizado para determinação da dureza do material.

Os corpos de prova deste ensaio mecânico devem ter as dimensões nominais de 175 milímetros de comprimento e 75 milímetros de largura.

A esfera de aço utilizada no ensaio deve ter 11,28 milímetros de diâmetro e 100 milímetros quadrados de área projetada. A esfera de aço é penetrada até sua metade (semiesfera) no material avaliado. A velocidade de penetração da esfera de aço adotada foi de 6 milímetros por minuto. Foram realizadas duas penetrações em uma das faces de cada corpo de prova. A localização dos pontos de penetração deve ter pelo menos 25 milímetros a partir das bordas e extremidades do corpo de prova e distância suficiente para uma penetração não afetar a outra, como estabelece a norma ASTM D1037:1999. A distância mínima adotada entre as duas penetrações, para este estudo, foi de 30 milímetros.

A leitura da força necessária para penetrar a semiesfera de aço no material é realizada no indicador da máquina universal. Os resultados da dureza Janka foram expressos em megapascal (MPa). Os ensaios de dureza Janka foram realizados em máquina universal de ensaios da AMSLER. O ensaio para a determinação da dureza Janka é apresentado na Figura 16.

(a)

(b)

Figura 16 - Corpo de prova para o ensaio de dureza (a) e ensaio de dureza Janka (b).

Deve ser destacado que a dureza Janka nos corpos de prova das três espécies de madeiras tropicais estudadas foi determinada na direção normal (ou perpendicular) às fibras da madeira.

Os resultados obtidos de dureza Janka foram comparados aos requisitos estabelecidos pela norma ANSI A208.1:1999, que estabelece um mínimo de 2225 N/cm^2 (22, 25 MPa) para painéis de alta densidade (igual ou superior a 800 kg/m^3), denominados pela norma de tipo H-1.

4.5.4.3 Impacto Charpy

Este ensaio mecânico tem a finalidade de obter a energia absorvida no impacto (obtida diretamente na leitura do equipamento), determinar a contração ou expansão lateral do corpo de prova (comparando suas dimensões finais e iniciais) e analisar a aparência da fratura (determinação do percentual de fratura frágil através da avaliação da face da fratura do corpo de prova).

Porém, tal ensaio mecânico é voltado para essas determinações em metais. Como os materiais deste estudo (painéis do planejamento II e madeiras tropicais maciças) necessitam de baixas energias para o rompimento do corpo de prova, se comparado aos metais, optou-se por avaliar apenas a quantidade de energia absorvida no impacto, expressa em joules (J).

Outra adaptação deste ensaio em relação aos materiais avaliados neste estudo foi a opção de não se fazer entalhe nos corpos de prova, justamente pela baixa energia absorvida no impacto (EAI).

Para a determinação desta propriedade, foi retirado um corpo de prova por painel e cinco corpos de prova para cada espécie de madeira tropical. Os corpos de prova possuíam as seguintes dimensões nominais: seção transversal de 10×10 milímetros e comprimento de 55 milímetros, como estabelece a norma ASTM E23:2012.

O equipamento utilizado no ensaio de impacto Charpy é da marca Heckert, na qual o martelo utilizado possui as seguintes características: energia de 50 J, massa de 6,915 quilogramas e braço de 380 milímetros. O ensaio de impacto Charpy é apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Ensaio de impacto Charpy (a) e suporte de fixação do corpo de prova (b).

4.5.4.4 Rugosidade superficial

Este ensaio tem a finalidade de avaliar o acabamento da superfície do material. Lembrando que este ensaio é indicado para avaliar o acabamento dos pisos. Porém, neste estudo avaliou-se o acabamento dos painéis produzidos e das madeiras tropicais maciças em sua forma crua, isto é, sem revestimentos.

Os corpos de prova utilizados neste ensaio são os mesmos utilizados no ensaio mecânico de dureza Janka, com dimensões nominais de 175 milímetros de comprimento e 75 milímetros de largura. Em uma das faces foi realizado o ensaio de rugosidade superficial e, posteriormente, na outra face do corpo de prova foi realizado o ensaio de dureza Janka.

Antes dos ensaios de rugosidade superficial, os corpos de prova de ambos os materiais (painéis de partículas do planejamento II e madeiras tropicais maciças) tiveram a superfície tratada manualmente com dois tipos de lixa: de desbaste, com gramatura 80 e lixa de acabamento, com gramatura 180. Após o lixamento, os corpos de prova foram devidamente manuseados, para evitar danos à superfície, que poderiam interferir na leitura do rugosímetro.

O rugosímetro utilizado é da marca Taylor Hobson, modelo surtronic 25. Os parâmetros de leitura da rugosidade superficial adotados foram: range (amplitude máxima que o apalpador do rugosímetro pode se deslocar durante a medição) de 300 microns, comprimento de amostragem (cut-off) de 2,5 milímetros, comprimento de avaliação de 12,5

milímetros e filtro do tipo 2CR. Tais parâmetros foram adotados por serem mais adequados para avaliar a rugosidade superficial de madeira e seus derivados. Esses parâmetros também foram adotados no estudo de Varanda et al. (2010), em sua avaliação da rugosidade superficial de peças lixadas a partir do lixamento tubular.

No ensaio de rugosidade superficial, o parâmetro de perfil obtido foi o desvio aritmético médio do perfil avaliado, definido como R_a , expresso em microns (μm), de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287:2002, p. 9. O R_a é o principal parâmetro do perfil de rugosidade de superfícies.

Para cada corpo de prova foram realizadas três medições de rugosidade superficial. O resultado final para cada corpo de prova foi expresso pela média aritmética destes três valores de R_a .

Obtidos os valores de R_a para os materiais avaliados (painéis de partículas do planejamento II e madeiras tropicais maciças), estes foram classificados de acordo com a classe de rugosidade, de acordo com o documento normativo ABNT NBR 8404:1984, p. 2. O ensaio de rugosidade superficial é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Ensaio de rugosidade superficial.

4.5.5 Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio

A análise de porosimetria por injeção de mercúrio tem sido extensivamente utilizada como uma técnica experimental para se caracterizar vários aspectos dos materiais porosos e dos pós. Proposta em 1921 por Washburn, que sugeriu ser possível obter a distribuição de diâmetros de poros a partir dos dados de pressão e volume, durante a penetração de um material poroso pelo mercúrio. Com base em tal sugestão, vinte e quatro anos depois, em

1945, Drake e Ritter publicaram os primeiros trabalhos a respeito da porosimetria por intrusão de mercúrio. Descreveram a construção e operação do equipamento e apresentaram grande quantidade de dados experimentais. Tais publicações foram a base de todos os posteriores trabalhos com porosimetria por intrusão de mercúrio (MATA, 1998).

Mata (1998) descreve detalhadamente como o software do equipamento porosímetro determina todas as propriedades porosimétricas, a partir do conhecimento das características porosas do material avaliado.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) é uma das técnicas mais importantes na determinação da porosimetria de materiais.

As propriedades porosimétricas avaliadas neste estudo foram: diâmetro médio dos poros (DMP), área total de poros (ATP), densidade aparente (DA) e percentual de porosidade.

Os corpos de prova possuem dimensões nominais de 10 milímetros de espessura, 14 milímetros de largura e 23 milímetros de comprimento. Estes foram secos em estufa com circulação de ar a 50°C por período de 24 horas antes da realização dos ensaios.

Na confecção dos corpos de prova, foram selecionadas nove amostras, sendo: uma amostra para cada espécie de madeira tropical, e uma amostra para cada um dos seis tratamentos dos painéis de partículas, como apresentado na Tabela 9. Em relação aos painéis avaliados, o critério desta seleção foi o maior teor de adesivo (13%), pressupondo que estes painéis apresentariam maior semelhança com as espécies de madeira maciça, quanto ao percentual de porosidade, por terem menos poros (mais adesivo).

Tabela 9 - Amostras retiradas para análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Tratamentos (Tr)	%CA	%Ades.	TA
Tr3	0	13	MF
Tr4	0	13	PU
Tr7	25	13	MF
Tr8	25	13	PU
Tr11	50	13	MF
Tr12	50	13	PU
Angelim Vermelho	Madeira maciça		
Cumaru	Madeira maciça		
Jatobá	Madeira maciça		

onde: Tr = tratamento; %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído e PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Para o seccionamento dos painéis e obtenção dos corpos de prova foi utilizada uma serra circular da marca Marajó, modelo KSN 7945.

Os ensaios foram conduzidos no equipamento Micromeritics Poresizer, modelo 9320, com capacidade de pressão de 200 MPa, apresentado na Figura 19. Os parâmetros utilizados no ensaio foram: mercúrio com tensão superficial de $0,494 \text{ g/cm}^2$ e densidade de $13,533 \text{ g/mL}$, ângulo de contato do avanço e retrocesso de 130° e tempo de equilíbrio entre a baixa e alta pressão de 10 segundos.

Neste estudo adotou-se como sendo 130° o ângulo de contato do avanço e retrocesso, por ser sugerido pelo software do equipamento Micromeritics. Em seu estudo, Mata (1998) utilizou o mesmo equipamento Micromeritics deste estudo e também adotou o ângulo de contato de 130° .

(a)

(b)

(c)

Figura 19 - Corpo de prova (a), cápsula para intrusão do mercúrio (b) e equipamento Micromeritics Poresizer – 9320 (c). Fonte: Adaptado de Bertolini (2011).

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram executados nas dependências do Instituto de Física de São Carlos - IFSC, USP.

4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é utilizada em diversas áreas do conhecimento. A utilização de tal técnica vem se tornando cada vez mais frequente, justamente por fornecer informações mais detalhadas e apresentar maior precisão, com aumentos da ordem de até 300 mil vezes (DUARTE et al., 2003).

De acordo com o Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo – CENTRAL ANALÍTICA IQ/USP (2016), a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons como fonte de “iluminação” sobre uma amostra a ser observada, ao invés de luz visível, onde é possível a obtenção de imagens com resoluções espaciais da ordem de centenas a milhares de vezes. Esta incidência de elétrons produz diversas interações passíveis de serem coletadas. Instrumentos de microscopia eletrônica modernos oferecem um grau detalhado de caracterizações estruturais, espectroscópicas, composicionais e cristalográficas, em diversos materiais biológicos, metálicos, poliméricos, cerâmicos e compósitos. Na técnica de MEV, ocorre a irradiação da superfície da amostra, onde os sinais elétricos produzidos são traduzidos na forma de imagem.

Nesse estudo, as amostras dos painéis para a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram retiradas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão estática. As amostras rompidas foram preparadas com os devidos cuidados no manuseio a fim de evitar possíveis alterações na superfície rompida, que poderiam alterar as características da região de ruptura dos painéis.

Realizou-se esta análise de MEV com o objetivo de observar as características de interação entre as partículas de *Pinus elliottii* e casca de aveia (*Avena sativa*) e o adesivo, além da distribuição destes constituintes.

Foram preparadas quatro amostras, sendo uma amostra de cada um dos seguintes tratamentos: Tr 1, Tr 2, Tr 9 e Tr 10, como apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Amostras retiradas para análise de microscopia eletrônica de varredura.

Tratamentos (Tr)	%CA	%Ades.	TA
Tr1	0	11	MF
Tr9	50	11	MF
Tr2	0	11	PU
Tr10	50	11	PU

onde: Tr = tratamento; %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído e PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Primeiramente as amostras foram colocadas em estufa a temperatura de 60°C por período de doze horas. Em seguida foram colocadas no porta amostras do equipamento de MEV. A estufa com circulação de ar utilizada é da marca Marconi, modelo MA 035.

As imagens de MEV foram apresentadas comparando-se as imagens referentes a duas situações: painel constituído apenas de partículas de *Pinus elliottii* e painel constituído de partículas de ambos os materiais (partículas de *Pinus elliottii* e casca de aveia). Ambos os painéis avaliados foram produzidos com 11% de adesivo (menor teor de adesivo desse estudo). Realizou MEV nos painéis com menos adesivo, a fim de avaliar a distribuição do adesivo nesses painéis. Como são análises de alto custo, foram estudados apenas alguns dos painéis com o menor teor de adesivo (11%). O objetivo desta forma de apresentação das imagens foi diferenciar a distribuição e interação dos constituintes presentes no painel constituído apenas de partículas de *Pinus elliottii* e no painel constituído de ambos os materiais.

Primeiro foram comparados os tratamentos Tr 1 e Tr 9, ambos produzidos com 11% de adesivo melamina formaldeído. Depois foram comparados os tratamentos Tr 2 e Tr 10, ambos produzidos com 11% de adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Outro objetivo dessa forma de apresentação das imagens de MEV foi mostrar a ótima interação das partículas de casca de aveia tanto com as partículas de *Pinus elliottii* quanto com os adesivos utilizados.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram geradas pelo equipamento Inspect F50 (Fei®, Holanda), pertencente ao Instituto de Física de São Carlos (IFSC/USP) e ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (SMM/EESC/USP).

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Todos os resultados obtidos nos ensaios realizados foram submetidos à análise estatística a fim de avaliar se os fatores e níveis adotados no delineamento experimental dos planejamentos I e II (Tabelas 3 e 5, respectivamente) apresentaram ou não influência no desempenho físico e mecânico dos painéis produzidos, a um nível de significância de 5% (MONTGOMERY, 2005).

A análise estatística adotada foi uma análise de variância (ANOVA), por meio do software Minitab®, versão 14.

A ANOVA teve como hipótese nula (H_0) a equivalência de médias entre os tratamentos, e a não equivalência como hipótese alternativa (H_1). Assim, p-valor do teste superior ao nível de significância implica aceitar H_0 , rejeitando-a em caso contrário. Para validar os resultados da ANOVA foram investigadas, para cada propriedade avaliada, a normalidade na distribuição das respostas (teste de normalidade de Anderson-Darling), a homogeneidade das variâncias entre os tratamentos (teste de Bartlett) e a independência dos resíduos (gráfico de resíduos x ordem de observação), como apresentado nos Apêndices.

Considerado significativo o fator individual sobre alguma das propriedades avaliadas, na sequência foi utilizado o teste de comparações múltiplas de Tukey (teste de contraste) com objetivo de agrupar (ordenadamente) os níveis do fator em questão, permitindo evidenciar o nível do fator mais significativo, a possível equivalência entre alguns níveis do fator, entre outras.

Considerada significativa a interação entre os fatores (dois a dois; três a três), gráficos de efeitos principais foram gerados para auxiliar na interpretação dos efeitos de interação. Cabe ressaltar que para o caso da interação entre os três fatores ser significativa, a análise visa a discussão dos efeitos proporcionados por ambos, não sendo necessária a apresentação dos gráficos de interação dos fatores dois a dois. A homogeneidade na fabricação dos painéis foi também avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2 adj) da ANOVA para cada propriedade investigada.

Dois planejamentos fatoriais completos foram delineados neste estudo. No primeiro, planejamento I (fase 2 da análise estatística), foram considerados todos os níveis dos três fatores em análise, o que configurou um planejamento com vinte tratamentos ($5^1 2^2$), como apresentado na Tabela 3.

Do planejamento I, as propriedades físicas e mecânicas investigadas foram:

inchamento em espessura, para períodos de 2 e 24 horas de imersão em água (I 2h e I 24h, respectivamente); absorção de água, para períodos de 2 e 24 horas de imersão em água (A 2h e A 24h, respectivamente); densidade (D); parâmetro razão de compactação (RC), módulo de elasticidade (MOE) e resistência (MOR), ambos na flexão estática, resistência à tração perpendicular (TP) e resistência ao arrancamento de parafuso, para face e topo (AP_f e AP_t, respectivamente). Os tratamentos do planejamento I que atenderam a maior parte dos requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras ABNT NBR 14810:2006 e ABNT NBR 14810:2013 foram mantidos, configurando o planejamento II.

Para tanto, foram excluídas as duas maiores frações mássicas de casca de aveia (75 e 100%), resultando 12 primeiros tratamentos explicitados na Tabela 3 (Tr1 a Tr12), frutos da combinação de três frações de casca de aveia (0, 25 e 50%), dos dois teores de adesivo (11 e 13%) e dois tipos de adesivo (poliuretano à base de óleo de mamona e melamina formaldeído). Para este segundo planejamento, as propriedades para pisos investigadas foram: perda de massa na abrasão (Ab), dureza Janka (DJ), energia absorvida no impacto (EAI) e rugosidade superficial (R_a).

Ressalta-se que para cada propriedade avaliada, em ambos os planejamentos, foram extraídos os corpos de prova para realização dos ensaios, implicando no uso de cinco réplicas de painéis por tratamento em cada análise estatística.

Por fim, compreendido o efeito dos fatores e das interações entre ambos em cada uma das quatro propriedades do segundo planejamento (Tabela 5), os doze tratamentos foram comparados, através da ANOVA e do teste de Tukey, com os resultados provenientes das mesmas propriedades obtidas nos ensaios envolvendo as três espécies de madeiras tropicais maciças (Angelim Vermelho, Cumaru e Jatobá), escolhidas em função da sua usual empregabilidade na confecção de pisos de madeira, possibilitando assim verificar a potencialidade do uso dos painéis fabricados como aplicação em pisos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos ao longo deste estudo, referentes à caracterização das partículas, propriedades físico-mecânicas dos painéis de partículas (planejamento I) e propriedades para pisos (planejamento II e as três espécies de madeiras maciças).

5.1 PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

5.1.1 Teor de umidade

Os resultados obtidos para o teor de umidade das partículas foram apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Teor de umidade das partículas de *Pinus elliottii* e casca de aveia.

Amostra	<i>Pinus elliottii</i>	Casca de aveia
	TU (%)	TU (%)
1	9,9	10,1
2	9,5	10,0
3	9,8	9,9
Média	9,8	10,0
CV (%)	2,4	1,0

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

O teor de umidade médio das partículas, ideal para a fabricação dos painéis, deve situar-se na faixa de 4 a 8% para a resina melamina formaldeído (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975; MALONEY, 1993; MOSLEMI, 1974) e na faixa de 8 a 10% para a resina poliuretana à base de óleo de mamona (BERTOLINI, 2011).

É imprescindível o controle desta variável durante a produção dos painéis, visto que teores de umidade superiores ao recomendado podem gerar prejuízos aos painéis, causando

excesso de vapor, surgimento de bolhas e explosões durante a prensagem, enquanto que variações inferiores ao recomendado podem causar deficiências na adesão entre partículas, influenciando negativamente no desempenho físico-mecânico dos painéis (BOWYER; SHMULSKY; HAYGREEN, 2003).

Neste estudo, o teor de umidade das partículas se encontrava na faixa de 9,8 a 10,0%. Durante a confecção dos painéis não ocorreram os defeitos mencionados, para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Ainda em relação a tal adesivo, Bertolini (2011) trabalhou com partículas que estavam com teor de umidade médio de 8,6%, isto é, muito semelhante ao deste estudo e também não relatou os defeitos já citados. A não ocorrência dos defeitos descritos, tanto neste estudo quanto no trabalho de Bertolini (2011), está diretamente relacionado ao tipo de adesivo utilizado, que apresenta boa trabalhabilidade, além do bom desempenho frente às variáveis discutidas.

Já em relação ao adesivo melamina formaldeído, como já mencionado, na metodologia dos estudos preliminares, pelo fato de tratar-se de adesivo à base de água, quando prensado libera muitos gases que ocasionam a explosão e a consequente perda do painel. Por estas razões, o ciclo de prensagem dos painéis produzidos com este adesivo (tanto preliminares, quanto definitivos) incluiu três alívios de pressão, sendo estes aos 2, 4 e aos 6 minutos de prensagem, para liberação dos gases gerados. Porém, este efeito está mais relacionado às características físico-químicas do adesivo melamina formaldeído do que ao teor de umidade das partículas utilizadas.

5.1.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada com as partículas de *Pinus elliottii* e de casca de aveia, retirando três amostras de 200 gramas cada, para cada um dos materiais.

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados médios obtidos na análise granulométrica das partículas de *Pinus elliottii* e de casca de aveia, respectivamente.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 12 e 13, nota-se a predominância de partículas com dimensões entre 0,595 e 1,190 mm, ou seja, cerca de 68% das partículas de *Pinus elliottii* e 75% das partículas de casca de aveia utilizadas apresentaram dimensão na faixa citada.

Tabela 12 - Distribuição granulométrica das partículas de *Pinus elliottii*.

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Média da massa retida (g)	Média da massa retida (%)
7	2,830	0,2	0,1
10	2,000	12,6	6,3
16	1,190	51,2	25,6
30	0,595	84,4	42,2
40	0,420	26,4	13,2
50	0,297	9,8	4,9
Finos < 50	< 0,297	15,4	7,7
Total		200,0	100,0

Tabela 13 - Distribuição granulométrica das partículas de casca de aveia.

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Média da massa retida (g)	Média da massa retida (%)
7	2,830	0,8	0,4
10	2,000	13,4	6,7
16	1,190	69,9	34,9
30	0,595	80,7	40,4
40	0,420	16,8	8,4
50	0,297	7,4	3,7
Finos < 50	< 0,297	11,0	5,5
Total		200,0	100,0

Weber (2011) produziu painéis de partículas com dimensões majoritariamente na faixa entre 0,84 e 2,00 milímetros e obteve desempenho físico-mecânico aceitável, apesar de utilizar partículas maiores se comparadas as dimensões das partículas empregadas neste estudo. Bertolini (2011) utilizou partículas com dimensões muito similares às partículas aqui adotadas e obteve bom desempenho físico-mecânico.

5.2 ESTUDOS PRELIMINARES

Os resultados preliminares obtidos foram apresentados nas subseções a seguir.

5.2.1 Etapa preliminar I

Na Tabela 14, têm-se os resultados do módulo de ruptura na flexão estática (MOR) e do inchamento em espessura após o período de duas horas de imersão em água (I 2h). O objetivo desta etapa foi determinar a temperatura de prensagem ideal para o adesivo melamina formaldeído.

Tabela 14 - Resultados da etapa preliminar I.

Temperatura de prensagem (°C)	Propriedade avaliada	Número de amostras	Resultados médios das 4 amostras	CV (%)
140	MOR	4	16,8 MPa	15,7
	I 2h	4	17,1 %	10,3
150	MOR	4	17,5 MPa	12,4
	I 2h	4	16,8 %	7,1
160	MOR	4	19,1 MPa	13,8
	I 2h	4	16,9 %	6,9
170	MOR	4	16,1 MPa	11,7
	I 2h	4	15,7 %	9,6
180	MOR	4	21,9 MPa	11,2
	I 2h	4	15,0 %	8,4

onde: MOR = módulo de ruptura na flexão estática; I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas e CV = coeficiente de variação das quatro amostras.

Como pode ser observado na Tabela 14, as temperaturas de 160 e 180°C resultaram em painéis com os melhores resultados de MOR. Por questões de redução de custos com energia elétrica (extrapolando para a realidade industrial) optou-se por trabalhar com a temperatura de prensagem de 160°C para o adesivo melamina formaldeído. Outro aspecto importante é que os resultados obtidos para a prensagem a 160°C satisfazem às exigências normativas para as propriedades físico-mecânicas avaliadas (MOR e I 2h).

5.2.2 Etapas preliminares II e III

A Tabela 15 apresenta os resultados do módulo de ruptura na flexão estática (MOR) e do inchamento em espessura após o período de duas horas de imersão em água (I 2h) para as etapas preliminares II e III. O objetivo destas etapas foi determinar o percentual de adesivo a ser adotado nos ensaios definitivos.

Tabela 15 - Resultados das etapas preliminares II e III.

Etapa	Adesivo	Teor de adesivo	Propriedade avaliada	Número de amostras	Resultados médios das 4 amostras	CV (%)
II	Melamina formaldeído	11%	MOR	4	13 MPa	13,2
			I 2h	4	17,7 %	7,4
		13%	MOR	4	15 MPa	21,6
			I 2h	4	15,2%	6,4
		15%	MOR	4	19 MPa	10,4
			I 2h	4	12,1 %	3,0
III	Poliuretano à base de óleo de mamona	11%	MOR	4	22 MPa	23,1
			I 2h	4	14,2 %	22,0
		13%	MOR	4	24 MPa	16,2
			I 2h	4	14,2 %	7,9
		15%	MOR	4	24 MPa	30,4
			I 2h	4	9,7 %	11,7

onde: MOR = módulo de ruptura na flexão estática; I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas e CV = coeficiente de variação das quatro amostras.

Como pode ser observado na Tabela 15, painéis produzidos com percentuais de adesivo 11 e 13% atenderam aos requisitos mínimos da norma ABNT NBR 14810:2013 para o MOR (requisito mínimo de 11 MPa para painéis não estruturais em condições secas). Por este motivo, optou-se por trabalhar com estes dois percentuais de adesivo: 11 e 13%.

Para a propriedade física inchamento em espessura após o período de duas horas (I 2h) a ABNT NBR 14810:2006 estabelece um máximo de 8% de inchamento. Nestas condições, os resultados preliminares para esta propriedade não atenderam aos requisitos.

Notou-se também, na Tabela 15, que nos testes preliminares o desempenho físico-mecânico dos painéis produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona foi superior, em comparação aos painéis produzidos com o adesivo melamina formaldeído.

A partir dos resultados preliminares foi possível definir os parâmetros que faltavam

para a produção dos painéis definitivos. Dentre estas variáveis, foi definida a temperatura de prensagem de 160°C para o adesivo melamina formaldeído e definidos os percentuais de adesivo, sendo 11 e 13%.

5.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PAINÉIS – PLANEJAMENTO I

Os resultados obtidos para as propriedades físico-mecânicas dos painéis avaliados foram comparados com os requisitos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 14810:2006, ABNT NBR 14810:2013, ANSI A208.1:1999 e BS EN 312:2003.

Como mencionado na metodologia, de cada painel foi retirado um corpo de prova para cada uma das propriedades físico-mecânicas avaliadas (esquema da Figura 7), exceto para a propriedade física teor de umidade (TU). Para esta foi retirado um corpo de prova para cada um dos dez painéis selecionados aleatoriamente, dentre os 100 painéis produzidos, apenas para verificar o TU médio dos painéis avaliados. Os resultados da propriedade TU dos painéis não foram submetidos à análise de variância (ANOVA). A seguir, foram apresentados os resultados do TU dos painéis, como mostra a Tabela 16.

Tabela 16 - Teor de umidade dos painéis de partículas.

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

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

Obteve-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 (JANKOVSKI, 1988).

Segundo Silva et al. (2006), após a produção (reconstituição da madeira), ocorre redução da umidade de equilíbrio dos painéis, se comparado à madeira sólida. Tal redução (ou diminuição da higroscopicidade) se deve à fragmentação da madeira em partículas e a posterior incorporação de adesivos, parafinas e outros aditivos, e, especialmente pela aplicação de altas temperaturas e pressões durante a prensagem e consolidação do painel (JANKOVSKI, 1988), fase em que, segundo Mendes (2001) ocorre o rearranjo e a diminuição das regiões higroscópicas da madeira.

Os painéis aglomerados produzidos por Weber e Iwakiri (2015) apresentaram teor de umidade na faixa de 7,3 a 9,0%, isto é, semelhante ao teor de umidade médio dos painéis deste estudo (9,2%).

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios ($\bar{x}$) e os coeficientes de variação (Cv) das propriedades físicas referentes ao planejamento I (20 tratamentos).

Tabela 17 - Resultados das propriedades físicas referente aos 20 tratamentos delineados.

Tr	Estat.	I 2h (%)	I 24h (%)	A 2h (%)	A 24h (%)	D (kg/m ³)	RC
1	$\bar{x}$	12,2	14,5	30,3	37,4	882	1,84
	Cv (%)	9,0	8,1	18,5	12,2	2,5	2,5
2	$\bar{x}$	7,6	12,7	12,5	29,2	892	1,86
	Cv (%)	15,1	12,2	17,2	17,4	2,4	2,4
3	$\bar{x}$	9,6	12,0	22,3	29,8	921	1,92
	Cv (%)	11,0	7,0	14,6	12,0	1,9	1,9
4	$\bar{x}$	5,6	11,3	5,1	18,4	931	1,94
	Cv (%)	17,5	15,9	12,4	15,6	4,9	4,9
5	$\bar{x}$	15,9	18,5	33,9	41,1	907	2,10
	Cv (%)	10,0	4,4	9,2	6,5	3,3	3,3
6	$\bar{x}$	7,6	13,9	6,7	26,7	972	2,25
	Cv (%)	16,8	18,2	15,2	14,6	4,9	4,9
7	$\bar{x}$	14,6	15,7	28,0	37,2	926	2,14
	Cv (%)	10,4	9,6	18,6	15,5	4,1	4,1
8	$\bar{x}$	5,5	12,9	5,7	21,2	980	2,27
	Cv (%)	17,8	9,6	19,3	16,9	5,1	5,1
9	$\bar{x}$	21,3	22,8	40,5	43,5	966	2,51
	Cv (%)	10,7	13,9	18,2	14,4	1,9	1,9
10	$\bar{x}$	7,8	16,8	6,9	26,9	941	2,44
	Cv (%)	18,9	10,5	10,0	16,1	9,1	9,1
11	$\bar{x}$	16,7	17,9	29,5	35,9	968	2,51
	Cv (%)	8,3	5,5	9,8	10,7	2,6	2,6
12	$\bar{x}$	5,8	11,8	5,0	16,5	990	2,57
	Cv (%)	12,2	16,8	14,7	9,6	7,1	7,1
13	$\bar{x}$	27,7	28,8	39,1	42,5	977	2,90
	Cv (%)	6,8	6,4	12,8	10,6	2,7	2,7
14	$\bar{x}$	7,5	22,7	7,1	30,8	995	2,95
	Cv (%)	19,7	9,2	12,3	15,2	2,6	2,6
15	$\bar{x}$	18,9	20,3	30,1	34,1	995	2,95
	Cv (%)	9,0	6,1	8,2	6,6	1,8	1,8
16	$\bar{x}$	6,8	17,1	7,0	29,6	931	2,76
	Cv (%)	13,6	10,8	9,3	17,2	7,6	7,6
17	$\bar{x}$	27,5	28,7	36,8	40,4	997	3,44
	Cv (%)	9,5	6,8	18,7	12,9	4,3	4,3
18	$\bar{x}$	6,0	19,2	4,0	20,8	1022	3,52
	Cv (%)	17,3	13,4	14,5	18,4	6,6	6,6
19	$\bar{x}$	21,6	25,1	29,1	32,9	1066	3,68
	Cv (%)	9,6	2,6	16,3	11,6	3,0	3,0
20	$\bar{x}$	2,6	12,0	2,9	12,8	1015	3,50
	Cv (%)	13,6	17,0	18,1	16,0	7,2	7,2

onde: Tr = tratamento; Estat. = estatísticas de valores médios ($\bar{x}$) e coeficientes de variação (Cv); I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; I 24h = inchamento em espessura para o período de vinte e quatro horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; A 24h = absorção de água para o período de vinte e quatro horas; D = densidade e RC = razão de compactação.

Como pode ser observado na Tabela 17, os coeficientes de variação obtidos para as

propriedades físicas avaliadas se encontraram abaixo de 20%, condizente aos coeficientes de variação obtidos no estudo de GAVA et al. (2015), entre outros. É importante lembrar que valores de coeficientes de variação inferiores a 20% são um bom indício da uniformidade do processo de produção dos painéis (DIAS, 2005; NASCIMENTO, 2003).

Na Tabela 18 têm-se os resultados das propriedades físicas dos painéis de outros três estudos recentes com aglomerados de alta densidade e os requisitos das propriedades físicas estabelecidos por três normas.

Os três estudos com aglomerados de alta densidade utilizados para comparação com os resultados deste trabalho foram: (a) Bertolini et al. (2014), que utilizaram partículas de *Pinus* sp. tratadas com preservante CCA e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, nas proporções de 8 e 10%; (b) Fiorelli et al. (2015), que utilizaram partículas de *Pinus* spp. com fibras de coco verde, aglutinados com os adesivos poliuretano à base de óleo de mamona, na proporção de 10%, e adesivo ureia formaldeído, na proporção de 12%; (c) Gava et al. (2015), que trabalharam com partículas de clones de seringueira (*Hevea brasiliensis*) aderidas com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, na proporção de 12%.

Quanto às normas, na ABNT NBR 14810:2006 foram consultados os requisitos físicos das propriedades inchamento em espessura para o período de duas horas de imersão em água (I 2h) e densidade (D) e para as propriedades mecânicas resistência ao arrancamento de parafuso, para face e topo (AP_f e AP_t , respectivamente). Na norma ABNT NBR 14810:2013 foram consultados os requisitos mecânicos para painéis de média densidade, com espessura nominal na faixa de 8 a 13 milímetros e do tipo P2, denominados painéis não estruturais para uso interno em condições secas.

A norma ANSI A208.1:1999 foi consultada quanto aos requisitos dos painéis de alta densidade (igual ou superior a 800 kg/m^3), denominados pela norma de tipo H-1. A norma BS EN 312:2003 foi consultada quanto aos requisitos físico-mecânicos para os painéis do tipo P4, denominados painéis para uso em condições secas.

Tabela 18 - Resultados das propriedades físicas referentes a outros estudos e aos requisitos normativos.

Autores	I 2h (%)	I 24h (%)	A 2h (%)	A 24h (%)	D (kg/m³)
Este estudo	2,6 a 27,7	11,3 a 28,8	2,9 a 40,5	12,8 a 43,5	882 a 1066
Bertolini et al. (2014)	4,1 a 10,6	8,6 a 16,3	-	-	760 a 880
Fiorelli et al. (2015)	6,9 a 26,0	-	12,8 a 69,8	-	720 a 850
Gava et al. (2015)	3,7	17,1	10,2	38,8	840
Normas	I 2h (%)	I 24h (%)	A 2h (%)	A 24h (%)	D (kg/m³)
ABNT NBR 14810:2006	8	-	-	-	551 a 750
ANSI A208.1:1999	-	-	-	-	≥ 800
BS EN 312:2003	-	16	-	-	-

onde: I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; I 24h = inchamento em espessura para o período de vinte e quatro horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; A 24h = absorção de água para o período de vinte e quatro horas e D = densidade.

Como pode ser observado na Tabela 18, para as propriedades inchamento em espessura (períodos de 2 e 24h), em linhas gerais, as faixas de resultados obtidos neste estudo são semelhantes às dos outros três estudos utilizados na comparação. Na tabela 17, para a propriedade inchamento em espessura (2h), dos vinte tratamentos avaliados, dez tratamentos (tratamentos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20, isto é, todos os tratamentos com o adesivo PU) apresentaram inchamento inferior a 8%, atendendo ao requisito da norma ABNT NBR 14810:2006. Para a propriedade inchamento em espessura (24h), nove tratamentos (tratamentos 1 a 4, 6 a 8, 12 e 20) apresentaram inchamento inferior a 16%, atendendo a norma BS EN 312:2003.

As propriedades absorção de água (para os períodos de 2 e 24h) não possuem requisitos em nenhuma das quatro normas consultadas. Para a propriedade absorção de água (2h), o resultado médio obtido por Gava et al. (2015) é semelhante a faixa de resultados obtidos neste estudo. Os painéis de partículas produzidos por Fiorelli et al. (2015) apresentaram absorção de água de até 69,8%, ou seja, superior aos resultados aqui obtidos (absorção de água na faixa de 2,9 a 40,5%). Para a propriedade absorção de água (24h), os valores obtidos neste estudo (absorção de água na faixa de 12,8 a 43,5%) são semelhantes ao valor médio de 38,8%, apresentado por Gava et al. (2015).

Na Tabela 17, a densidade dos painéis apresentou baixos coeficientes de variação por

tratamento. Entretanto, apresentou grande variação entre os tratamentos avaliados, com resultados na faixa de 882 a 1066 kg/m³ (Tabela 18). Nos outros três estudos foram obtidas densidades dos painéis entre 720 a 880 kg/m³. Tal variação também foi constatada em outros trabalhos e pode estar associada a dois fatores: ao processo de confecção dos painéis em laboratório, principalmente nas etapas de montagem do colchão e/ou na adição de adesivo; às diferentes características anatômicas e físicas das partículas dos materiais usados na confecção dos painéis. De acordo com Iwakiri (1989), diferenças na densidade final do painel estão associadas ao material utilizado na respectiva manufatura, a variáveis como o teor de umidade das partículas e as diferenças de densidade entre as partículas empregadas na confecção de tais painéis. Painéis de partículas de alta densidade devem apresentar densidade igual ou superior a 800 kg/m³, de acordo com a norma ANSI A208.1:1999 e IWAKIRI (2005).

Quanto à razão de compactação dos painéis, como se observa na Tabela 17, os valores médios obtidos foram na faixa de 1,84 a 3,68, ou seja, muito semelhantes aos encontrados por Mendes et al. (2010), que obteve valores na faixa de 1,39 a 3,12. Os citados autores produziram painéis aglomerados de média densidade, constituídos de bagaço de cana e madeira de *Eucalyptus* e com adesivos fenol formaldeído e ureia formaldeído.

Neste trabalho, os valores da razão de compactação se explicam pela baixa densidade aparente do material casca de aveia (290 kg/m³), uma vez que este parâmetro é inversamente proporcional à razão de compactação. Ou seja, como a razão de compactação é definida pela relação da densidade do painel pela densidade das partículas, quanto menor esta, maior será a razão de compactação.

A Tabela 19 apresenta os valores médios ($\bar{x}$) e os coeficientes de variação (Cv) das propriedades mecânicas referentes ao planejamento I (20 tratamentos).

Tabela 19 - Resultados das propriedades mecânicas referente aos 20 tratamentos delineados.

Tr	Estat.	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	APf (N)	APt (N)
1	$\bar{x}$	2704	24,4	1,54	890	1570
	Cv (%)	8,3	11,1	13,8	15,1	13,2
2	$\bar{x}$	2549	29,9	1,97	1480	2750
	Cv (%)	8,5	8,0	18,6	15,6	12,9
3	$\bar{x}$	3110	27,9	2,33	990	1850
	Cv (%)	15,6	17,9	13,1	9,7	11,1
4	$\bar{x}$	2566	31,6	2,72	1500	2890
	Cv (%)	11,6	9,7	14,1	13,7	9,0
5	$\bar{x}$	2310	19,9	0,92	490	1250
	Cv (%)	6,2	6,5	17,3	18,3	13,9
6	$\bar{x}$	2052	25,4	2,46	1270	2330
	Cv (%)	11,6	10,2	17,9	9,1	8,5
7	$\bar{x}$	2847	24,4	1,54	910	1210
	Cv (%)	9,7	8,9	12,0	13,7	12,5
8	$\bar{x}$	2406	31,2	2,55	1330	2170
	Cv (%)	9,3	11,8	9,7	18,1	16,5
9	$\bar{x}$	2018	17,0	0,64	540	610
	Cv (%)	11,3	16,0	18,1	17,8	16,8
10	$\bar{x}$	1909	24,5	2,32	1010	2220
	Cv (%)	6,3	8,4	16,1	15,0	16,7
11	$\bar{x}$	2328	20,4	0,91	680	650
	Cv (%)	8,4	15,0	11,5	12,3	17,2
12	$\bar{x}$	2135	30,2	2,02	1200	2270
	Cv (%)	7,4	5,9	16,9	16,4	8,5
13	$\bar{x}$	1810	13,8	0,35	290	360
	Cv (%)	4,3	10,4	18,8	14,4	15,2
14	$\bar{x}$	2027	29,4	2,09	850	1890
	Cv (%)	11,1	5,5	16,3	13,2	17,6
15	$\bar{x}$	1831	13,7	0,44	420	460
	Cv (%)	14,6	15,8	11,6	13,6	17,9
16	$\bar{x}$	1936	28,8	1,32	940	1820
	Cv (%)	6,6	9,9	14,6	17,0	12,5
17	$\bar{x}$	1430	11,5	0,13	240	260
	Cv (%)	16,7	16,4	8,3	17,4	16,1
18	$\bar{x}$	1776	23,8	1,67	670	1430
	Cv (%)	10,5	16,6	10,5	15,5	17,1
19	$\bar{x}$	1808	12,2	0,34	340	390
	Cv (%)	5,6	16,1	16,8	12,3	19,0
20	$\bar{x}$	1763	26,8	1,43	1070	2370
	Cv (%)	7,6	7,8	15,3	15,7	8,4

onde: Tr = tratamento; Estat. = estatísticas de valores médios ($\bar{x}$) e coeficientes de variação (Cv); MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; MOR = módulo de ruptura na flexão estática; TP = resistência à tração perpendicular; APf = arrancamento de parafuso para face e APt = arrancamento de parafuso para topo.

Como pode ser observado na Tabela 19, os coeficientes de variação obtidos para as

propriedades mecânicas avaliadas se encontraram abaixo de 20%, condizente aos coeficientes de variação obtidos no estudo de GAVA et al. (2015), entre outros.

Na Tabela 20 foram apresentados os resultados das propriedades mecânicas dos painéis de outros três estudos recentes com aglomerados de alta densidade e os requisitos das propriedades mecânicas estabelecido por quatro normas.

Tabela 20 - Resultados das propriedades mecânicas referentes a outros estudos e aos requisitos normativos.

Autores	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	APf (N)	APt (N)
Este estudo	1430 a 3110	11,5 a 31,6	0,13 a 2,72	240 a 1500	260 a 2890
Bertolini et al. (2014)	1947 a 2200	17,4 a 22,5	1,59 a 2,74	-	-
Fiorelli et al. (2015)	859 a 2274	8,7 a 25,8	-	-	-
Gava et al. (2015)	1894	13,2	2,68	-	-
Normas	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	APf (N)	APt (N)
ABNT NBR 14810:2013	1800	11	0,4	1020*	800*
ANSI A208.1:1999	2400	16,5	0,9	1800	1325
BS EN 312:2003	2300	16	0,4	-	-

onde: MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; MOR = módulo de ruptura na flexão estática; TP = resistência à tração perpendicular; APf = arrancamento de parafuso para face; APt = arrancamento de parafuso para topo e, * = requisitos da norma ABNT NBR 14810:2006, para as propriedades APf e APt.

Como pode ser observado na Tabela 20, no ensaio de flexão estática as duas propriedades avaliadas (módulo de elasticidade – MOE e módulo de ruptura – MOR), em linhas gerais apresentaram faixas de resultados semelhantes aos outros três estudos utilizados na comparação. Apenas o trabalho de Fiorelli et al. (2015) considerou alguns tratamentos que apresentaram valores menores de MOE e MOR, se comparados a este estudo. Tal trabalho obteve seus dados de MOE na faixa de 859 a 2274 MPa e valores de MOR na faixa de 8,7 a 25,8 MPa.

Na Tabela 19, para a propriedade MOE, dos vinte tratamentos avaliados, dezessete deles apresentaram MOE superior a 1800 MPa, atendendo ao requisito da norma ABNT NBR

14810:2013 (apenas os tratamentos 17, 18 e 20 não atenderam a esta norma). Oito tratamentos (Tr 1 a 5, Tr 7, Tr 8 e Tr 11) apresentaram MOE superior a 2300 MPa, atendendo à norma BS EN 312:2003. Seis tratamentos (Tr 1 a 4, Tr 7 e Tr 8) apresentaram MOE superior a 2400 MPa, atendendo à norma ANSI A208.1:1999.

Para o MOR, dos vinte tratamentos avaliados, todos apresentaram valores superiores a 11 MPa, atendendo ao requisito da norma ABNT NBR 14810:2013 (para painéis do tipo P2 e espessura nominal de 10 milímetros). As normas BS EN 312:2003 e ANSI A208.1:1999 possuem requisitos para o MOR de 16 e 16,5 MPa, respectivamente. Apenas os tratamentos 13, 15, 17 e 19 não atenderam a estas duas normas, em relação ao MOR, como mostra a Tabela 19.

Quanto à propriedade resistência à tração perpendicular (TP), a faixa de resultados obtidos neste estudo é coerente aos resultados de Bertolini et al. (2014) e de Gava et al. (2015). Na Tabela 19, dos vinte tratamentos avaliados, dezessete deles apresentaram TP superior a 0,4 MPa, atendendo aos requisitos das normas ABNT NBR 14810:2013 e BS EN 312:2003 (apenas os tratamentos 13, 17 e 19 não atenderam a estas normas). Quinze tratamentos apresentaram TP superior a 0,9 MPa, atendendo à norma ANSI A208.1:1999 (os tratamentos 9, 13, 15, 17 e 19 não atenderam a esta norma).

Em relação às propriedades arrancamento de parafuso (face e topo), os resultados deste estudo são semelhantes aos resultados obtidos por Ferro (2013) e Souza et al. (2014). Na Tabela 19, para a propriedade arrancamento de parafuso na face do painel, dos vinte tratamentos avaliados, apenas seis (Tr 2, 4, 6, 8, 12 e 20) apresentaram APf superior a 1020 N, atendendo à norma ABNT NBR 14810:2006.

Deve ser destacado que a norma ABNT NBR 14810:2006 não estabelece requisitos para o arrancamento de parafuso (face e topo), em painéis com espessura entre 8 e 13 milímetros, somente para painéis produzidos com espessura acima de 14 milímetros (requisitos de 1020 N para face e 800 N para topo). Mas, para painéis com espessuras nominais inferiores a 14 milímetros, são comumente adotados os requisitos estabelecidos para painéis com espessura maior que 14 milímetros. Ainda para APf, nenhum dos tratamentos avaliados neste estudo atendeu a norma ANSI A208.1:1999 (requisito de 1800 N).

Para a propriedade arrancamento de parafuso topo (APt), na Tabela 19, dos vinte tratamentos avaliados, apenas seis deles (Tr 9, 11, 13, 15, 17 e 19) não apresentaram APf superior a 800 N. Portanto, a norma ABNT NBR 14810:2006 foi atendida em quatorze tratamentos avaliados. Ainda para a propriedade APt, doze tratamentos (Tr 1 a 4, Tr 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20) avaliados neste estudo atenderam à norma ANSI A208.1:1999 (requisito

de 1325 N).

A Tabela 21 apresenta os resultados dos testes de normalidade e de homogeneidade de variâncias dos resíduos da ANOVA referente ao planejamento I.

Tabela 21 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA referente ao planejamento I (20 tratamentos).

P-valor	I 2h	I 24h	A 2h	A 24h	D	RC
<i>Anderson-Darling</i>	0,741	0,898	0,352	0,895	0,570	0,566
<i>Bartlett</i>	0,245	0,321	0,593	0,742	0,083	0,865
<i>Levene</i>	0,699	0,480	0,846	0,976	0,353	0,977
P-valor	MOR	MOE	TP	APf	APt	
<i>Anderson-Darling</i>	0,792	0,424	0,218	0,123	0,373	
<i>Bartlett</i>	0,590	0,197	0,082	0,784	0,630	
<i>Levene</i>	0,940	0,934	0,729	0,966	0,755	

onde: I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; I 24h = inchamento em espessura para o período de vinte e quatro horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; A 24h = absorção de água para o período de vinte e quatro horas; D = densidade; RC = razão de compactação; MOR = módulo de ruptura na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; TP = resistência à tração perpendicular; APf = arrancamento de parafuso para face e APt = arrancamento de parafuso para topo.

Constatou-se da Tabela 21 que os resíduos da ANOVA, por variável resposta investigada, apresentaram distribuição normal, que as variâncias dos resíduos entre os tratamentos foram equivalentes e que os resíduos por propriedade foram independentes (Apêndice A – gráficos de resíduos x ordem de observação).

A Tabela 22 apresenta os resultados da ANOVA para as propriedades físicas e mecânicas investigadas no primeiro planejamento experimental.

Tabela 22 - Resultados da ANOVA referentes ao planejamento I.

Fatores e Interações	I 2h	I 24h	A 2h	A 24h	D	RC
%CA	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,116	0,073	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%Ades.	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,070	0,107
TA	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,500	0,764
%CA×%Ades.	0,261	0,093	<u>0,019</u>	0,238	0,255	0,272
%CA×TA	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,060	0,145
%Ades.×TA	0,072	0,576	0,143	0,927	0,198	0,124
%CA×%Ades.×TA	0,106	0,051	0,236	0,256	0,150	0,107
R² (adj)	96,25%	89,87%	93,50%	81,08%	43,94%	94,97%
Fatores e Interações	MOR	MOE	TP	APf	APt	
%CA	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	
%Ades.	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,093	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	
TA	<u>0,000</u>	<u>0,019</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	
%CA×%Ades.	<u>0,014</u>	0,076	0,068	0,145	0,196	
%CA×TA	<u>0,000</u>	0,062	0,093	0,790	0,328	
%Ades.×TA	0,542	0,112	<u>0,000</u>	0,639	0,380	
%CA×%Ades.×TA	0,686	0,704	0,116	0,108	0,073	
R² (adj)	85,06%	76,39%	91,81%	88,20%	93,23%	

onde: %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; R² (adj) = coeficiente de determinação ajustado da ANOVA; I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; I 24h = inchamento em espessura para o período de vinte e quatro horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; A 24h = absorção de água para o período de vinte e quatro horas; D = densidade; RC = razão de compactação; MOR = módulo de ruptura na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; TP = resistência à tração perpendicular; APf = arrancamento de parafuso para face e APt = arrancamento de parafuso para topo.

Na Tabela 22 foram apresentados os fatores (percentual de casca de aveia, percentual de adesivo e tipo de adesivo) e também a interação destes fatores (dois a dois; três a três). Os p-valores menores ou iguais a 0,05 encontram-se sublinhados e são considerados significativos sobre a propriedade avaliada, a um nível de significância de 5% (confiabilidade de 95%), conforme Montgomery (2005).

Quando o fator individual foi considerado significativo sobre alguma das propriedades avaliadas, na sequência utilizou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey (teste de contraste) com objetivo de agrupar (ordenadamente) os níveis do fator em questão, permitindo evidenciar o nível do fator mais significativo e a possível equivalência entre alguns níveis do fator avaliado.

Quando a interação entre os fatores (dois a dois; três a três) foi admitida como significativa sobre alguma das propriedades avaliadas, gráficos de efeitos principais foram gerados para auxiliar na interpretação dos efeitos de interação. Ressalta-se que, quando a interação entre os três fatores é significativa, a análise visa discutir os efeitos proporcionados

por ambos, não sendo necessário apresentar os gráficos de interação dos fatores dois a dois.

Ainda na tabela 22, a homogeneidade na fabricação dos painéis foi também avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2 adj), da ANOVA, para cada propriedade investigada. Todas as propriedades físico-mecânicas avaliadas apresentaram suficiente homogeneidade, com exceção da densidade, que para a qual R^2 ajustado alcançou 43,94%. Os resultados do teste de comparações múltiplas de Tukey referentes ao planejamento I foram apresentados nas Tabelas 23 (fator percentual de casca de aveia) e na Tabela 24 (fatores: percentual de adesivo e tipo de adesivo).

Tabela 23 - Resultados do teste de Tukey referente ao fator percentual de casca de aveia (variações nas frações de casca de aveia).

Propriedades	%CA				
	0%	25%	50%	75%	100%
I 2h (%)	8,74 (B)	10,93 (B)	12,91 (AB)	15,22 (A)	14,39 (A)
I 24h (%)	12,61 (C)	15,26 (BC)	17,32 (B)	22,23 (A)	21,25 (A)
A 2h (%)	17,53 (A)	18,58 (A)	20,48 (A)	20,81 (A)	18,20 (A)
A 24h (%)	28,70 (A)	31,54 (A)	30,70 (A)	34,24 (A)	26,75 (A)
D (kg/m ³)	906,4 (C)	946,35 (BC)	966,15 (B)	974,45 (B)	1025 (A)
RC	1,89 (E)	2,19 (D)	2,51 (C)	2,89 (B)	3,53 (A)
MOR (MPa)	28,5 (A)	25,2 (AB)	23,0 (B)	21,4 (BC)	18,6 (C)
MOE (MPa)	2732 (A)	2404 (B)	2098 (C)	1901 (CD)	1694 (D)
TP (MPa)	2,14 (A)	1,86 (AB)	1,47 (B)	1,05 (C)	0,89 (C)
APf (MPa)	1215 (A)	1000 (AB)	857,5 (BC)	625 (C)	580 (C)
APt (MPa)	2265 (A)	1740 (AB)	1437,5 (B)	1132,5 (B)	1112,5 (B)

onde: %CA = percentual de casca de aveia; I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; I 24h = inchamento em espessura para o período de vinte e quatro horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; A 24h = absorção de água para o período de vinte e quatro horas; D = densidade; RC = razão de compactação; MOR = módulo de ruptura na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; TP = resistência à tração perpendicular; APf = arrancamento de parafuso para face e APt = arrancamento de parafuso para topo.

Do teste de Tukey, a letra “A” representa o tratamento com maior valor médio para a propriedade avaliada, a letra “B” representa o tratamento com o segundo maior valor médio para a propriedade avaliada e assim sucessivamente. Letras iguais implicam tratamentos com médias equivalentes, isto é, que não diferem entre si a um nível de 5% de significância (ou 95% de confiabilidade), segundo Montgomery (2005).

No caso das letras combinadas, médias seguidas de pelo menos uma letra não diferem entre si, a um nível de 5% de significância. Por exemplo: um tratamento representado pelas letras combinadas “AB” possui média equivalente à média do tratamento representado pela letra “A” e também possui média equivalente à do tratamento representado pela letra “B”.

Na Tabela 23, os painéis com 75 e 100% de casca de aveia apresentaram os piores desempenhos físicos em relação às propriedades inchamento em espessura (2 e 24h) e absorção de água (2 e 24h).

As propriedades físicas absorção de água (2 e 24h) apresentaram médias estatisticamente equivalentes entre os cinco níveis do fator percentual de casca de aveia avaliados. Os painéis com percentuais de 75 e 100% de casca de aveia apresentaram maiores densidades e razão de compactação.

Para as cinco propriedades mecânicas avaliadas, apesar de a maioria dos níveis do fator percentual de casca de aveia atender ao requisito de uma ou mais normas, os painéis com percentuais de 75 e 100% de partículas de casca de aveia apresentaram os piores desempenhos mecânicos. Esse resultado possivelmente está associado a alta razão de compactação (na faixa de 2,76 a 3,68, conforme a Tabela 17), onde ocorreu uma excessiva compactação e, conseqüentemente, o esmagamento das partículas, reduzindo as propriedades mecânicas de tais painéis.

Na Tabela 24, primeiramente pode ser observado que os painéis com maior percentual de adesivo (13%) apresentaram melhor desempenho físico (menores valores médios de inchamento em espessura e absorção de água) e melhor desempenho mecânico (maiores valores médios das cinco propriedades mecânicas avaliadas).

A propriedade física densidade e o parâmetro razão de compactação apresentaram valores médios estatisticamente equivalentes, para os dois fatores avaliados (percentual de adesivo e tipo de adesivo).

Também pode ser constatado que os painéis produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram melhor desempenho físico-mecânico, se comparados aos painéis produzidos com o adesivo melamina formaldeído. Já é estabelecido, na literatura, que o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona alcança melhor desempenho físico-

mecânico que o adesivo melamina formaldeído na produção de painéis análogos aos aqui estudados.

A propriedade mecânica resistência à tração perpendicular do painel (TP) apresentou valores médios estatisticamente equivalentes para o fator percentual de adesivo.

Tabela 24 - Resultados do teste de Tukey referentes ao planejamento I (fator percentual de adesivo e fator tipo de adesivo).

Propriedades	%Ades.		TA	
	11%	13%	MF	PU
I 2h (%)	14,12 (A)	10,75 (B)	18,59 (A)	6,28 (B)
I 24h (%)	19,85 (A)	15,61 (B)	20,43 (A)	15,03 (B)
A 2h (%)	21,77 (A)	16,47 (B)	31,96 (A)	6,29 (B)
A 24h (%)	33,92 (A)	26,85 (B)	37,48 (A)	23,92 (B)
D (kg/m ³)	955,14 (A)	972,20 (A)	960,52 (A)	966,52 (A)
RC	2,58 (A)	2,62 (A)	2,61 (A)	2,60 (A)
MOR (MPa)	22,0 (B)	24,7 (A)	18,5 (B)	28,2 (A)
MOE (MPa)	2059 (B)	2273 (A)	2111 (B)	2273 (A)
TP (MPa)	1,41 (A)	1,56 (A)	0,91 (B)	2,05 (A)
APf (MPa)	773 (B)	938 (A)	579 (B)	1132 (A)
APt (MPa)	1467 (B)	1658 (A)	861 (B)	2214 (A)

onde: %Ades. = fator percentual de adesivo; TA = fator tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído; PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona; I 2h = inchamento em espessura para o período de duas horas; I 24h = inchamento em espessura para o período de vinte e quatro horas; A 2h = absorção de água para o período de duas horas; A 24h = absorção de água para o período de vinte e quatro horas; D = densidade; RC = razão de compactação; MOR = módulo de ruptura na flexão estática; MOE = módulo de elasticidade na flexão estática; TP = resistência à tração perpendicular; APf = arrancamento de parafuso para face e APt = arrancamento de parafuso para topo.

A Figura 20 apresenta os gráficos de interação entre fatores para as propriedades físicas investigadas, consideradas significativas pela ANOVA, de acordo com a Tabela 22.

Figura 20 - Gráficos de interação entre fatores para as propriedades físicas. Interação %CA x TA: no I 2h (a); no I 24h (b), na A 2h (c), na A 24h (d) e interação %CA x %Ades na A 2h (e).

Pode ser observado, nas Figuras 20a a 20d, que os painéis produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PU) apresentaram menores valores médios de inchamento em espessura para 2 e 24h e absorção de água para 2 e 24h, se comparados aos painéis produzidos com adesivo melamina formaldeído (MF). Os painéis produzidos com o adesivo PU apresentaram melhor desempenho físico.

Na Figura 20e, os painéis produzidos com maior percentual de adesivo (13%) apresentaram menores valores médios de absorção de água para 2h, se comparados aos painéis produzidos com 11% de adesivo. Os painéis produzidos com 13% de adesivo apresentaram melhor desempenho físico.

A Figura 21 apresenta os gráficos de interação entre fatores para as propriedades mecânicas investigadas, consideradas significativas pela ANOVA, de acordo com a Tabela 22.

Figura 21 - Gráficos de interação entre fatores em relação as propriedades mecânicas: %CA x %Ades para o MOR (a); %CA x TA para o MOR (b) e %Ades x TA para a TP (c).

Na Figura 21a, nota-se que os painéis produzidos com 13% adesivo apresentaram maiores valores médios do módulo de ruptura na flexão estática (MOR), se comparados aos painéis produzidos com 11% de adesivo.

Na Figura 21b, observa-se que os painéis produzidos com o adesivo PU apresentaram maiores valores médios de MOR, se comparados aos produzidos com o adesivo MF.

Na Figura 21c, os painéis produzidos com o adesivo PU apresentaram maiores valores médios de resistência à tração perpendicular (TP), se comparados aos painéis produzidos com o adesivo MF.

5.4 PROPRIEDADES PARA PISOS – PLANEJAMENTO II

Nesta subseção foram apresentados os resultados da avaliação de ambos os materiais (painéis de partículas do planejamento II e madeiras tropicais maciças) para aplicações em pisos.

Como já mencionado na metodologia (seção 4.5.1), o delineamento experimental realizado na caracterização físico-mecânica dos painéis, apresentado na Tabela 3, originou vinte tratamentos (planejamento I).

Como os painéis produzidos com 75 e 100% de partículas de casca de aveia (tratamentos 13 a 20, da Tabela 3) não apresentaram desempenho físico-mecânico satisfatório, foram descartados desta segunda etapa do estudo (planejamento II).

Na Tabela 25, foram apresentados o teor de umidade e a densidade aparente das três espécies de madeira tropical utilizadas.

Tabela 25 - Resultados do teor de umidade e da densidade aparente das três espécies de madeira tropical.

Espécie de madeira	TU (%)	D (kg/m³)
Angelim Vermelho	12,1 (2,7)	1090 (1,9)
Cumaru	12,2 (2,1)	1040 (1,6)
Jatobá	12,0 (1,5)	950 (1,4)

onde: TU = teor de umidade, D = densidade aparente a 12% de umidade e entre parênteses tem-se o coeficiente de variação das três amostras, expresso em porcentagem (%).

Para a espécie Angelim Vermelho, o valor de densidade aparente (a 12% de umidade) obtido neste estudo foi de 1090 kg/m³. Este resultado é semelhante ao encontrado por Lahr et al. (2010), que obtiveram densidade aparente (a 12% de umidade) para o Angelim Vermelho de 1130 kg/m³.

Para a espécie Cumaru, a densidade aparente (a 12% de umidade) obtida neste estudo foi de 1040 kg/m³. Este resultado é condizente ao encontrado por Andrade e Jankowsky (2015), que obtiveram densidade aparente (a 12% de umidade) para o Cumaru de 1070 kg/m³.

Para a espécie Jatobá, a densidade aparente (a 12% de umidade) obtida neste estudo foi de 950 kg/m³. Este resultado é inferior ao encontrado por Lahr et al. (2010), que obtiveram densidade aparente (a 12% de umidade) para o Jatobá de 1070 kg/m³.

A Tabela 26 apresenta os valores médios ($\bar{x}$) e os coeficientes de variação (Cv) das

propriedades para pisos, referentes ao planejamento II (12 tratamentos) e também das três espécies de madeiras tropicais investigadas.

Tabela 26 - Resultados obtidos das propriedades avaliadas referentes ao planejamento II e as espécies de madeira.

Tr	Estat.	Ab (mg)	DJ (MPa)	EAI (J)	Ra (μm)
1	$\bar{x}$	292	130,4	0,25	8,6
	Cv (%)	19,0	5,7	20,0	18,9
2	$\bar{x}$	116	106,1	0,34	8,9
	Cv (%)	19,8	7,7	19,2	18,6
3	$\bar{x}$	204	134,8	0,23	8,1
	Cv (%)	7,4	17,6	11,9	19,6
4	$\bar{x}$	244	124,6	0,33	6,7
	Cv (%)	13,2	14,7	17,3	18,8
5	$\bar{x}$	136	134,5	0,32	9,9
	Cv (%)	17,7	12,3	17,8	19,8
6	$\bar{x}$	230	115,5	0,33	8,1
	Cv (%)	17,4	14,6	8,3	17,1
7	$\bar{x}$	126	125,9	0,28	8,3
	Cv (%)	17,4	18,9	20,4	19,3
8	$\bar{x}$	186	122,1	0,38	7,5
	Cv (%)	17,3	12,3	15,0	15,0
9	$\bar{x}$	170	139,1	0,32	9,9
	Cv (%)	17,6	12,1	17,8	6,6
10	$\bar{x}$	190	124,2	0,35	8,0
	Cv (%)	11,2	9,5	10,1	18,7
11	$\bar{x}$	106	148,3	0,33	9,5
	Cv (%)	18,4	7,7	13,6	13,1
12	$\bar{x}$	174	126,8	0,38	8,1
	Cv (%)	14,4	8,8	15,0	19,6
Angelim	$\bar{x}$	230	140,9	5,08	6,9
Vermelho	Cv (%)	8,7	13,0	20,8	18,0
Cumarú	$\bar{x}$	276	135,4	5,04	3,2
	Cv (%)	10,7	13,7	17,8	15,1
Jatobá	$\bar{x}$	266	129,7	4,40	1,9
	Cv (%)	14,7	3,7	19,6	18,5

onde: Tr = tratamento; Estat. = estatísticas de valores médios ($\bar{x}$) e coeficientes de variação (Cv); PMA = perda de massa na abrasão; DJ = dureza Janka; EAI = energia absorvida no impacto e Ra = desvio aritmético médio do perfil de rugosidade superficial.

Como pode ser observado na Tabela 26, os coeficientes de variação obtidos para as propriedades avaliadas no planejamento II, se encontraram abaixo de 20,8%, condizente aos

coeficientes de variação obtidos no estudo de LAHR et al. (2010).

Em relação ao ensaio de resistência à abrasão (Ab), como já mencionado na metodologia (subseção 4.5.4.1), segundo a norma ABNT NBR 14535:2008, no referido ensaio os resultados podem ser expressos de três maneiras distintas: em termos da taxa de desgaste, perda de massa e número de ciclos de desgaste. Neste estudo, os resultados do ensaio de abrasão foram expressos em função da perda de massa, calculada obtendo-se a massa do corpo de prova, perdida com o desgaste causado pelos rebolos abrasivos. Tal perda foi expressa em miligramas em função de um determinado número específico de ciclos (4200 ciclos neste estudo).

Deve-se destacar a carência de trabalhos na literatura com relação a ensaios de resistência à abrasão em painéis de partículas, principalmente no tocante aos estudos que expressam a resistência à abrasão em função do parâmetro perda de massa na abrasão. Andrade e Jankowsky (2015) obtiveram perda de massa na abrasão de 210 miligramas em 1000 ciclos de desgaste, para a espécie de madeira tropical Angelim Vermelho, ou seja, resultado muito semelhante ao deste estudo (230 miligramas em 4200 ciclos) para a mesma espécie tropical de madeira.

Deve ser lembrado, que neste estudo foi estabelecido atingir a classe de abrasão AC4 (mínimo de 4000 ciclos de abrasão), justamente pelo bom desempenho físico-mecânico alcançado pela maior parte dos tratamentos adotados no delineamento experimental do planejamento I. Esse bom desempenho físico-mecânico levou à melhor eficiência de aplicação de tais painéis em ambientes com maiores solicitações (comercial) e tráfego com intensidade média, conforme apresentado na metodologia, na Tabela 8.

Quanto à propriedade dureza Janka (DJ), pode ser observado na Tabela 26, que os resultados médios obtidos para os doze tratamentos avaliados são semelhantes aos valores médios determinados para as três espécies de madeira avaliadas. Deve ser lembrado que a dureza Janka determinada para as tais espécies de madeira é a dureza na direção normal (ou perpendicular) às fibras.

Andrade e Jankowsky (2015) caracterizaram várias espécies de madeira comumente aplicadas para pisos. A DJ foi determinada para as madeiras a 12% de umidade e os resultados no sentido normal às fibras foram: Angelim Vermelho 143,9 MPa, Cumaru 157 MPa e Jatobá 109,4 MPa. Se comparados a este estudo, os resultados da DJ para o Angelim Vermelho são semelhantes. Para a espécie Cumaru, o resultado obtido por Andrade e Jankowsky (2015) é superior. E para a espécie Jatobá, o resultado deste estudo é superior.

Haselein et al. (2002) determinaram a DJ de painéis de partículas de *Pinus elliottii*

Engelm com densidade de 700 kg/m^3 . Seus resultados situaram na faixa de 49,1 a 62,9 MPa, isto é, bem abaixo dos valores médios obtidos neste estudo. Carvalho et al. (2015) determinaram a DJ de painéis de partículas de *Pinus* sp. e erva mate, com densidade de 670 a 700 kg/m^3 . Seus resultados de DJ situaram na faixa de 28,9 a 39,7 MPa, ou seja, bem abaixo dos valores médios obtidos neste estudo.

Os resultados obtidos de dureza Janka foram comparados ao requisito de 2225 N/cm^2 (22,25 MPa), estabelecido pela norma ANSI A208.1:1999, para painéis de alta densidade (igual ou superior a 800 kg/m^3), denominados pela norma de tipo H-1. Como pode ser observado na Tabela 26, os doze tratamentos avaliados, assim como as três espécies de madeiras avaliadas, atenderam ao requisito da norma ANSI A208.1:1999.

Quanto à energia absorvida no impacto (EAI), pode ser observado, na Tabela 26, que os doze tratamentos avaliados apresentaram EAI menor, se comparada à EAI das três espécies de madeiras tropicais. Monteiro et al. (2006) determinaram a EAI de compósitos de poliéster reforçados com fibras de piaçava, que situaram na faixa de 5,5 a 21,6 J, ou seja, resultados superiores aos resultados obtidos para os painéis deste estudo.

Oliveira (2013) determinou a EAI de painéis de partículas de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e bagaço de cana-de-açúcar e obteve EAI na faixa de 3,4 a 6,2 J, isto é, superior aos resultados dos painéis deste estudo. Segundo o IPT (2015), a EAI para madeiras de Angelim Vermelho e Jatobá, ambas a 15% de umidade, são de 48,7 e 33,7 J, respectivamente. Isto é, superiores ao obtido para as mesmas duas espécies neste estudo, ambas a 12% de umidade: Angelim Vermelho foi 5,08 J e Jatobá foi 4,40 J. Porém, o IPT não especifica as características do martelo utilizado. Neste estudo utilizou-se martelo com as seguintes características: energia de 50 J, massa de 6,915 quilogramas e braço de 380 milímetros.

Quanto à rugosidade superficial (R_a), os valores médios obtidos para os doze tratamentos avaliados, foram superiores as espécies Cumaru e Jatobá, e valores próximos ao valor médio obtido para o Angelim Vermelho (R_a de $6,9 \mu\text{m}$). Rolleri e Roffael (2010) estudaram a rugosidade superficial de painéis de partículas de madeira com adesivo ureia formaldeído e obtiveram valores de R_a na faixa de 5,2 a $11,2 \mu\text{m}$, isto é, semelhantes aos valores obtidos para os doze tratamentos de painéis avaliados neste estudo, com R_a médios na faixa de $6,7$ a $9,9 \mu\text{m}$.

Varanda et al. (2010) avaliaram a rugosidade superficial de peças de *Eucalyptus grandis* submetidas ao lixamento tubular e obtiveram R_a médio de $7,4 \mu\text{m}$, após o processo de usinagem. Os resultados obtidos por Varanda et al. (2010) são semelhantes aos valores médios

obtidos neste estudo.

Os valores de Ra dos produtos e materiais avaliados (painéis de partículas do planejamento II e madeiras tropicais maciças, apresentados na Tabela 26) foram classificados de acordo com a classe de rugosidade, segundo a norma ABNT NBR 8404:1984, apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Classes de rugosidade segundo a norma ABNT NBR 8404:1984.

Classe de rugosidade	Rugosidade Ra (μm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N09	6,3
N08	3,2
N07	1,6
N06	0,8
N05	0,4
N04	0,2
N03	0,1
N02	0,05
N01	0,025

Fonte: ABNT NBR 8404:1984, p.2.

Como pode ser observado na Tabela 26, os painéis referentes aos doze tratamentos avaliados, apresentaram Ra na faixa de 6,7 a 9,9 μm , ou seja, pertence à classe de rugosidade N10, segundo a Tabela 27.

Quanto às três espécies de madeiras avaliadas, como pode ser observado na Tabela 26, o Angelim Vermelho apresentou Ra médio de 6,9 μm , pertencendo também à classe de rugosidade N10, conforme a Tabela 27.

Pela Tabela 26, as espécies Cumaru e Jatobá apresentaram Ra médios de 3,2 e 1,9 μm , respectivamente, pertencendo à classe de rugosidade N08, conforme a Tabela 27.

A Tabela 28 apresenta os resultados dos testes de normalidade e de homogeneidade de variâncias dos resíduos da ANOVA referentes ao planejamento II.

Tabela 28 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA referentes ao planejamento II (12 tratamentos).

P-valor	Ab	DJ	EAI	Ra
<i>Anderson-Darling</i>	0,142	0,624	0,582	0,182
<i>Bartlett</i>	0,467	0,544	0,879	0,944
<i>Levene</i>	0,324	0,497	0,964	0,966

onde: Ab = resistência à abrasão; DJ = dureza Janka; EAI = energia absorvida no impacto e Ra = desvio aritmético médio do perfil de rugosidade superficial.

Da Tabela 28 constatou-se que os resíduos da ANOVA por variável resposta investigada apresentaram distribuição normal e que as variâncias dos resíduos entre os tratamentos foram equivalentes, validando o modelo da ANOVA (Apêndice B – gráficos de resíduos x ordem de observação).

A Tabela 29 apresenta os resultados da ANOVA para as propriedades investigadas no planejamento experimental II.

Tabela 29 - Resultados da ANOVA referentes ao planejamento II.

Fatores e Interações	Ab	DJ	EAI	Ra
%CA	<u>0,000</u>	0,080	<u>0,003</u>	0,192
%Ades.	0,056	0,222	0,801	0,062
TA	0,078	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	<u>0,004</u>
%CA×%Ades.	<u>0,007</u>	0,518	0,555	0,374
%CA ×TA	<u>0,000</u>	0,788	0,220	0,458
%Ades.×TA	<u>0,000</u>	0,410	0,134	0,909
%CA×%Ades.×TA	<u>0,000</u>	0,506	0,406	0,349
R² (adj)	72,15%	58,23%	43,67%	62,91%

onde: %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; R² (adj) = coeficiente de determinação ajustado da ANOVA; Ab = resistência à abrasão; DJ = dureza Janka; EAI = energia absorvida no impacto e Ra = desvio aritmético médio do perfil de rugosidade superficial.

Na Tabela 29 foram apresentados os fatores (percentual de casca de aveia, percentual de adesivo e tipo de adesivo) e também a interação destes fatores (dois a dois; três a três). Os p-valores menores ou iguais a 0,05 encontram-se sublinhados e são significativos sobre a propriedade avaliada, a um nível de significância de 5%, conforme Montgomery (2005).

A homogeneidade na fabricação dos painéis foi também avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado (R² adj) da ANOVA para cada propriedade investigada. Das quatro propriedades avaliadas, a energia absorvida no impacto (EAI) apresentou a menor homogeneidade, com R² ajustado de 43,67%.

As Tabelas 30 e 31 apresentam os resultados do teste de comparações múltiplas de Tukey, referentes ao planejamento II.

Tabela 30 - Resultados do teste de Tukey referente ao planejamento II (variações nas frações de casca de aveia).

Propriedades	%CA		
	0%	25%	50%
Ab (mg)	210 (A)	170 (B)	160 (B)
DJ (MPa)	124,5 (A)	124,5 (A)	134,6 (A)
EAI (J)	0,29 (B)	0,33 (A)	0,35 (A)
Ra (μm)	8,04 (A)	8,43 (A)	8,90 (A)

onde: %CA = percentual de casca de aveia; Ab = resistência à abrasão; DJ = dureza Janka; EAI = energia absorvida no impacto e Ra = desvio aritmético médio do perfil de rugosidade superficial.

Tabela 31 - Resultados do teste de Tukey referente ao planejamento II (variações dos teores de adesivo e dos tipos de adesivo).

Propriedades	%Ades.		TA	
	11%	13%	MF	PU
Ab (mg)	170 (A)	190 (A)	170 (A)	190 (A)
DJ (MPa)	125,3 (A)	130,4 (A)	135,5 (A)	120,2 (B)
EAI (J)	0,32 (A)	0,33 (A)	0,29 (B)	0,35 (A)
Ra (μm)	8,36 (A)	8,61 (A)	9,03 (A)	7,88 (B)

onde: %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído; PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona; Ab = resistência à abrasão; DJ = dureza Janka; EAI = energia absorvida no impacto e Ra = desvio aritmético médio do perfil de rugosidade superficial.

Como pode ser observado na Tabela 30, os painéis constituídos com partículas de aveia (25 e 50% de casca de aveia) apresentaram menores perdas de massa na abrasão (Ab), se comparados aos produzidos com 100% de *Pinus elliottii* (0% de casca de aveia). Isso possivelmente se deve ao maior teor de sílica encontrado no material casca de aveia, se comparado às partículas de *Pinus elliottii*.

Para as propriedades dureza Janka (DJ) e rugosidade superficial (Ra), os painéis produzidos apresentaram médias estatisticamente equivalentes entre os três níveis avaliados

do fator percentual de casca de aveia. Quanto à propriedade energia absorvida no impacto (EAI), os painéis constituídos com partículas de casca de aveia (25 e 50% de casca de aveia) apresentaram maior EAI, se comparado aos painéis produzidos com 100% de *Pinus elliottii*.

Quanto à Tabela 31, primeiramente pode ser observado que para as quatro propriedades avaliadas, os painéis produzidos com 11 e 13% de adesivo apresentaram médias estatisticamente equivalentes, quanto ao fator percentual de adesivo.

Também pode ser observado que para o parâmetro perda de massa na abrasão, os painéis produzidos com os adesivos melamina formaldeído e poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram médias estatisticamente equivalentes, quanto ao fator tipo de adesivo.

Para a propriedade dureza Janka, os painéis com adesivo melamina formaldeído apresentaram melhor desempenho. Para a energia absorvida no impacto, os painéis com adesivo melamina formaldeído apresentaram menor valor (os corpos de prova apresentaram rompimento mais frágil), se comparados aos painéis com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Ainda na Tabela 31, os painéis produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram melhor acabamento superficial (menores valores de rugosidade) se comparados aos painéis produzidos com o adesivo melamina formaldeído.

A Figura 22 apresenta o gráfico de interação entre os três fatores considerados significativos pela ANOVA na propriedade resistência à abrasão (Ab), de acordo com a Tabela 29.

Figura 22 - Gráfico de interação entre os três fatores para a resistência à abrasão (Ab).

Na Figura 22, notou-se que os painéis produzidos com partículas de casca de aveia (25 e 50%) seguiram a tendência de perder menos massa na abrasão com o aumento do teor de

adesivo. Isso é esperado, pois com o aumento do teor de adesivo, aumenta-se a resistência superficial do painel. Ainda em relação aos painéis produzidos com 25 e 50% de casca de aveia, os painéis produzidos com o adesivo melamina formaldeído apresentaram melhor desempenho na abrasão (perderam menos massa no ensaio de resistência à abrasão).

Quanto aos painéis produzidos apenas com partículas de *Pinus elliottii* (0% de casca de aveia), a perda de massa na abrasão aumentou com o aumento do teor de adesivo. Ainda para os painéis de *Pinus elliottii*, os produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram melhor desempenho na abrasão (perderam menos massa no ensaio de resistência à abrasão).

Em relação ao fator percentual de adesivo, para os painéis produzidos com 11% de adesivo, o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentou melhor desempenho (menor perda de massa na abrasão). Para os painéis produzidos com 13% de adesivo, o adesivo melamina formaldeído apresentou melhor desempenho (menor perda de massa na abrasão).

A Tabela 32 apresenta os resultados dos testes de normalidade e de homogeneidade de variâncias dos resíduos da ANOVA referentes à comparação dos 12 tratamentos do planejamento II com as três espécies de madeira tropical.

Tabela 32 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA referentes à comparação dos 12 tratamentos do planejamento II com as três espécies de madeira.

P-valor	Ab	DJ	EAI	Ra
<i>Anderson-Darling</i>	0,329	0,476	0,517	0,435
<i>Bartlett</i>	0,583	0,340	0,654	0,295
<i>Levene</i>	0,453	0,363	0,939	0,648

onde: Ab = resistência à abrasão; DJ = dureza Janka; EAI = energia absorvida no impacto e Ra = desvio aritmético médio do perfil de rugosidade superficial.

Da Tabela 32 constatou-se que os resíduos da ANOVA por variável resposta investigada apresentaram distribuição normal e que as variâncias dos resíduos entre os tratamentos foram equivalentes, validando o modelo da ANOVA (Apêndice C – gráficos de resíduos x ordem de observação).

A Tabela 33 apresenta os resultados do teste de Tukey confrontando-se os doze tratamentos do planejamento II com as três espécies de madeira investigadas.

Tabela 33 - Resultados do teste de Tukey da comparação entre os doze tratamentos do planejamento II com as três espécies de madeira investigadas.

Material	Ab (mg)	DJ (MPa)	EAI (J)	Ra (µm)
Tr1	292 A	130,4 AB	0,25 B	8,54 AB
Tr2	116 FG	108,1 B	0,34 B	8,86 AB
Tr3	204 BCD	134,8 AB	0,23 B	8,04 AB
Tr4	244 ABC	124,6 AB	0,33 B	6,72 AB
Tr5	136 EFG	134,5 AB	0,32 B	9,86 A
Tr6	230 ABCD	115,5 AB	0,33 B	8,10 AB
Tr7	126 EFG	125,8 AB	0,28 B	8,32 AB
Tr8	186 CDE	122,1 AB	0,38 B	7,44 AB
Tr9	170 DEFG	139,1 AB	0,32 B	9,88 A
Tr10	190 CDE	124,2 AB	0,35 B	8,00 AB
Tr11	106 G	148,3 A	0,33 B	9,54 AB
Tr12	174 DEF	126,8 AB	0,38 B	8,16 AB
Angelim Vermelho	230 ABCD	140,9 AB	5,08 A	6,88 AB
Cumaru	276 A	135,4 AB	5,04 A	3,24 C
Jatobá	266 AB	129,7 AB	4,40 A	1,86 C

onde: Tr = tratamento; Ab = resistência à abrasão; DJ = dureza Janka; EAI = energia absorvida no impacto e Ra = desvio aritmético médio do perfil de rugosidade superficial.

Na Tabela 33, pode ser observado, para a propriedade resistência à abrasão (Ab), que para cada uma das três espécies de madeira avaliadas ocorreu equivalência estatística entre as médias de pelo menos um dos doze tratamentos comparados. A perda de massa média do Angelim Vermelho foi equivalente à perda de massa média dos tratamentos 6 e 4. A perda de massa média do Cumaru foi equivalente à perda de massa média do tratamento 1. A perda de

massa média do Jatobá foi equivalente à perda de massa média dos tratamentos 4 e 6. Cabe destacar que a maior parte dos tratamentos avaliados (tratamentos 2, 3, 5 e tratamentos 7 ao 12) apresentou desempenho superior na abrasão (menores médias de perdas de massa no ensaio) se comparados às três espécies de madeira avaliadas.

Para a propriedade dureza Janka (DJ), a média das três espécies de madeira avaliadas se mostrou estatisticamente equivalente a média de dez tratamentos, dentre os doze comparados.

Na propriedade energia absorvida no impacto (EAI), as espécies de madeira foram significativamente superiores aos valores médios de EAI dos painéis fabricados segundo os doze tratamentos.

Quanto à rugosidade superficial, o valor médio de Ra da espécie Angelim Vermelho foi estatisticamente equivalente ao valor médio de Ra de dez tratamentos, dentre os doze tratamentos comparados. As espécies de madeira Cumaru e Jatobá apresentaram melhor acabamento superficial (menores valores de Ra), se comparadas aos painéis do planejamento II.

Destaca-se que nas três propriedades avaliadas (Ab, DJ e rugosidade superficial), quanto ao desempenho para pisos, os painéis referentes aos doze tratamentos do planejamento II apresentaram valores estatisticamente equivalentes aos provenientes das madeiras avaliadas, evidenciando a potencialidade de aplicação dos painéis produzidos na indústria de pisos engenheirados.

5.5 ANÁLISE DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Nesta subseção foram apresentados os resultados da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

Estas análises foram procedidas em nove amostras de produtos/materiais diferentes (seis amostras de painéis de partículas do planejamento II e três amostras de madeiras tropicais).

Como apresentado na metodologia, a Tabela 9 mostra os seis tratamentos do planejamento II que foram selecionados para a análise de PIM. Os critérios de seleção destas amostras foram descritos na metodologia (no subitem 4.5.5).

Tabela 9: Amostras retiradas para análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Tratamentos (Tr)	%CA	%Ades.	TA
Tr3	0	13	MF
Tr4	0	13	PU
Tr7	25	13	MF
Tr8	25	13	PU
Tr11	50	13	MF
Tr12	50	13	PU
Angelim Vermelho	Madeira maciça		
Cumaru	Madeira maciça		
Jatobá	Madeira maciça		

onde: Tr = tratamento; %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído e PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

A Tabela 34 apresenta as propriedades porosimétricas dos materiais avaliados.

Tabela 34 - Propriedades porosimétricas das amostras analisadas.

Propriedades porosimétricas	Tr3	Tr4	Tr7	Tr8	Tr11	Tr12
DMP (μm)	9,74	11,75	10,06	13,61	9,33	4,77
ATP (m^2/g)	10,98	15,74	13,15	17,29	14,85	21,73
DA (g/mL)	1,27	1,29	1,40	1,39	1,45	1,49
<i>Porosidade (%)</i>	30,2	33,7	31,4	33,7	31,3	27,0
Propriedades porosimétricas	Av	C	J			
DMP (μm)	0,04	0,32	0,13			
ATP (m^2/g)	25,50	14,43	22,75			
DA (g/mL)	1,57	1,49	1,61			
<i>Porosidade (%)</i>	22,6	32,4	34,5			

onde: DMP = diâmetro médio dos poros; ATP = área total de poros; DA = densidade aparente; Av = Angelim Vermelho; C = Cumaru e J = Jatobá.

Como pode ser observado na Tabela 34, o diâmetro médio dos poros (DMP) das três espécies de madeiras tropicais (faixa de 0,04 a 0,32 μm) é inferior ao DMP dos painéis do planejamento II (faixa de 4,77 a 13,61 μm).

A área total de poros (ATP) das três espécies de madeiras tropicais (faixa de 14,43 a 25,50 m²/g) é semelhante a ATP dos painéis do planejamento II (faixa de 10,98 a 21,73 m²/g).

A densidade aparente (DA) das três espécies de madeiras tropicais (faixa de 1,49 a 1,61 g/mL) é semelhante a DA dos painéis do planejamento II (faixa de 1,27 a 1,49 g/mL).

A característica porosimétrica mais importante é a porosidade (MATA, 1998). Nas três espécies de madeiras tropicais a porosidade obtida foi na faixa de 22,6 a 34,5%, muito semelhante aos valores de porosidade dos painéis do planejamento II, que situaram na faixa de 27,0 a 33,7%.

Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Varanda et al. (2012), que produziram painéis de partículas de *Eucalyptus grandis* e casca de aveia e obtiveram porosidade na faixa de 25,50 a 38,64%. Os resultados obtidos por Bertolini (2014), na faixa de 11,78 a 55,70%, para painéis de partículas de madeira e de borracha de pneu, mostram maior amplitude de porosidade (alguns tratamentos menos porosos e outros tratamentos mais porosos) se comparados a este estudo.

A análise de porosimetria por intrusão de mercúrio reforça a potencialidade de aplicação dos painéis produzidos na indústria de pisos engenheirados, confirmando a similaridade entre as três espécies de madeiras tropicais e os painéis (do planejamento II) produzidos neste estudo, semelhança em relação às propriedades para pisos.

5.6 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Nesta subseção foram apresentadas as imagens geradas na análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Como apresentado na metodologia (subitem 4.6), as análises de MEV foram procedidas em quatro amostras de materiais diferentes, sendo uma amostra de cada um dos seguintes tratamentos: Tr 1, Tr 2, Tr 9 e Tr 10, como apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Amostras retiradas para análise de microscopia eletrônica de varredura.

Tratamentos (Tr)	%CA	%Ades.	TA
Tr1	0	11	MF
Tr9	50	11	MF
Tr2	0	11	PU
Tr10	50	11	PU

onde: Tr = tratamento; %CA = percentual de casca de aveia; %Ades. = percentual de adesivo; TA = tipo de adesivo; MF = adesivo melamina formaldeído e PU = adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

As imagens de MEV foram apresentadas comparando-se duas situações: painel constituído apenas de partículas de *Pinus elliottii* e painel constituído de partículas de ambos os materiais (partículas de *Pinus elliottii* e partículas de casca de aveia). O objetivo desta forma de apresentação das imagens foi diferenciar a distribuição e interação dos constituintes presentes no painel constituído apenas de partículas de *Pinus elliottii* e no painel constituído de ambos os materiais.

Primeiro foram comparados os tratamentos Tr 1 e Tr 9, cujos painéis foram produzidos com 11% de adesivo melamina formaldeído. Depois foram comparados os tratamentos Tr 2 e Tr 10, cujos painéis produzidos com 11% de adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Outro objetivo dessa forma de apresentação das imagens de MEV foi mostrar a adequada interação das partículas de casca de aveia tanto com as partículas de *Pinus elliottii* quanto com os adesivos utilizados.

As imagens de MEV realizadas foram apresentadas nas Figuras 23 a 26.

Figura 23 - Imagens de MEV - escala de 2 milímetros: tratamento 1 (a); tratamento 9 (b); escala de 200 microns: tratamento 1 (c) e tratamento 9 (d).

Como pode ser observado na Figura 23, ocorre uma adequada interação entre as partículas nos dois tratamentos avaliados (Tr 1 e Tr 9). Na Figura 23a, pode ser notada a boa interação entre as partículas de *Pinus elliottii*. Na Figura 23b pode-se perceber também a interação que ocorreu entre as partículas, tanto entre as de *Pinus elliottii* quanto entre as de ambos os materiais (partículas de *Pinus elliottii* e partículas de casca de aveia).

Nas Figuras 23c e 23d é possível observar a conveniente interação entre as partículas de ambos os materiais e o adesivo melamina formaldeído, destacando a distribuição do adesivo entre as partículas.

Figura 24 - Imagens de MEV - escala de 50 microns: tratamento 1 (a) e tratamento 9 (b)

Na Figura 24 é possível notar com maior nitidez, em comparação à Figura 23, a interação existente entre as partículas e também entre as partículas e o adesivo melamina formaldeído.

A partir das Figuras 23 e 24, foi possível notar a semelhança (em relação à interação dos constituintes do painel) entre os materiais dos tratamentos Tr 1 e Tr 9, ou seja, a proximidade entre os materiais em relação à interação entre as partículas e destas com o adesivo melamina formaldeído.

As Figuras 25 e 26 apresentam as imagens de MEV para os tratamentos Tr 2 e Tr 10, ambos produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 25 - Imagens de MEV - escala de 2 milímetros: tratamento 2 (a); tratamento 10 (b); escala de 200 microns: tratamento 2 (c) e tratamento 10 (d).

Como pode ser observado na Figura 25, para ambos os materiais (Tr 2 e Tr 10) ocorreu uma adequada interação entre as partículas. Na Figura 25a, no painel do Tr 2 a interação entre as partículas de *Pinus elliottii* é claramente perceptível. Isso também ocorre na Figura 25b, em que o painel do Tr 10 apresenta boa interação, tanto entre as partículas de *Pinus elliottii* quanto entre as partículas de ambos os materiais (*Pinus elliottii* e casca de aveia).

Nas Figuras 25c e 25d, além da boa interação entre as partículas, também é possível perceber a conveniente interação entre as partículas de ambos os materiais e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, destacando a distribuição do adesivo entre as partículas.

Figura 26 - Imagens de MEV - escala de 50 microns: tratamento 2 (a) e tratamento 10 (b).

Na Figura 26 é possível observar com maior nitidez, em comparação à Figura 25, a boa interação tanto entre as partículas, como entre as partículas e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

A partir das Figuras 25 e 26, foi possível observar a equivalência em relação à interação entre as partículas e destas com o adesivo, para ambos os materiais avaliados (Tr 2 e Tr 10).

Esse fato reforça ainda mais o desempenho altamente satisfatório do material casca de aveia, resíduo agroindustrial até então sem potencial de uso, que foi adicionado nos painéis de partículas deste estudo para aplicação em pisos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos foi possível registrar as seguintes conclusões:

- Nos testes preliminares foram definidos a temperatura de prensagem de 160 °C para o adesivo melamina formaldeído e os teores de adesivo de 11 e 13% que, juntamente com os cinco percentuais de casca de aveia, resultaram num delineamento experimental com vinte tratamentos;
- Em termos de propriedades físicas dos painéis, todos foram classificados como de alta densidade (acima de 800 kg/m³) e apresentaram teor de umidade médio de 9,2%. Os painéis produzidos com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PU) apresentaram melhor desempenho físico, especialmente quanto ao inchamento em espessura para o período de duas horas. Quanto ao inchamento em espessura para o período de vinte e quatro horas, todos os tratamentos avaliados atenderam aos requisitos de pelo menos uma norma. As propriedades absorção de água (para 2 e 24h) não possuem requisitos normativos, porém os resultados encontrados são coerentes a outros estudos comparados. A razão de compactação obtida esta na faixa de 1,84 a 3,68, ou seja, muito semelhante às encontradas em outros estudos utilizados na comparação dos resultados;
- Em relação às propriedades mecânicas dos painéis, na flexão estática, dezessete dos vinte tratamentos avaliados atenderam a pelo menos uma norma quanto ao MOE e todos os tratamentos atenderam a pelo menos uma norma quanto ao MOR. No caso da resistência à tração perpendicular (TP), dezessete tratamentos atenderam a pelo menos uma norma. Para o arrancamento de parafuso para face, seis tratamentos atingiram os requisitos de pelo menos uma norma e para arrancamento de parafuso para topo, quatorze tratamentos atingiram os requisitos de pelo menos uma norma;
- Quanto à análise estatística das propriedades físico-mecânicas avaliadas, os fatores individuais (percentual de casca de aveia, percentual de adesivo e tipo de adesivo) foram significativos, a um nível de significância de 5%, na maioria das propriedades físico-mecânicas avaliadas. As duas interações entre fatores dois a dois (percentual de casca de aveia x percentual de adesivo; percentual de casca de aveia x tipo de adesivo) foram significativas,

a um nível de significância de 5%, em pelo menos uma propriedade física e em pelo menos uma propriedade mecânica avaliada. A interação entre fatores dois a dois (percentual de adesivo x tipo de adesivo) foi significativa, a um nível de significância de 5%, na propriedade mecânica resistência à tração perpendicular (TP);

- Os painéis com percentuais de 75 e 100% de casca de aveia apresentaram maiores densidades e razão de compactação, bem como desempenhos físico-mecânicos inferiores, se comparados aos painéis com percentuais de 0, 25 e 50% de partículas de casca de aveia. Os painéis produzidos com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PU) apresentaram melhor desempenho físico-mecânico se comparados aos painéis produzidos com o adesivo melamina formaldeído. Os painéis com maior percentual de adesivo (13%) apresentaram melhor desempenho físico-mecânico, se comparados aos painéis produzidos com 11% de adesivo;
- Quanto às três espécies de madeiras tropicais avaliadas, todas apresentaram teor de umidade médio de 12% e altas densidades, situadas na faixa de 950 a 1090 kg/m³;
- Em relação às propriedades para pisos, para o ensaio de resistência à abrasão, atingiu-se a classe de abrasão AC4 (mínimo de 4000 ciclos de abrasão), justamente pelo bom desempenho físico-mecânico alcançado pela maior parte dos tratamentos avaliados inicialmente (painéis com percentuais de 0, 25 e 50% de casca de aveia). A dureza Janka dos doze tratamentos avaliados, assim como as três espécies de madeiras estudadas, atenderam ao requisito da norma ANSI A208.1:1999. Para a propriedade energia absorvida no impacto (EAI), os doze tratamentos avaliados apresentaram EAI bem menor, se comparados às três espécies tropicais. Os valores de EAI, neste estudo, também são menores que os encontrados na literatura. Para a rugosidade superficial, os painéis referentes aos doze tratamentos avaliados, apresentaram Ra na faixa de 6,7 a 9,9 µm, ou seja, pertencentes a classe de rugosidade N10 (Ra até 12,5 µm), segundo a ABNT NBR 8404:1984. A espécie de madeira Angelim Vermelho apresentou Ra médio de 6,9 µm, também pertencendo a classe de rugosidade N10. As espécies Cumaru e Jatobá apresentaram Ra médios de 3,2 e 1,9 µm, respectivamente, pertencendo ambas as espécies, a classe de rugosidade N8 (Ra até 3,2 µm), segundo a ABNT NBR 8404:1984;

- Quanto à análise estatística das propriedades para pisos, os fatores individuais (percentual de casca de aveia e tipo de adesivo) foram significativos, a um nível de significância de 5%, em pelo menos duas das quatro propriedades avaliadas. As três interações entre fatores dois a dois (percentual de casca de aveia x percentual de adesivo; percentual de casca de aveia x tipo de adesivo e percentual de adesivo x tipo de adesivo) foram significativas, a um nível de significância de 5%, na propriedade resistência à abrasão (Ab). A interação entre fatores três a três (percentual de casca de aveia x percentual de adesivo x tipo de adesivo) também foi significativa, a um nível de significância de 5%, na propriedade resistência à abrasão (Ab);
- Os painéis constituídos com partículas de casca de aveia (25 e 50%) apresentaram menores perdas de massa no ensaio de abrasão (Ab) e maior energia absorvida no impacto (EAI), se comparados aos produzidos com 100% de *Pinus elliottii*. Para as propriedades dureza Janka (DJ) e rugosidade superficial (Ra), os painéis produzidos apresentaram médias estatisticamente equivalentes entre os três níveis avaliados do fator percentual de casca de aveia. Para as quatro propriedades avaliadas, os painéis produzidos com 11 e 13% de adesivo apresentaram médias estatisticamente equivalentes, quanto ao fator percentual de adesivo. Quanto ao fator tipo de adesivo, para a propriedade resistência à abrasão (Ab), os painéis produzidos com os adesivos melamina formaldeído e poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram médias estatisticamente equivalentes. Para a propriedade dureza Janka, os painéis com adesivo melamina formaldeído apresentaram melhor desempenho. Para a propriedade energia absorvida no impacto, os painéis com adesivo melamina formaldeído apresentaram menor energia absorvida. Os painéis produzidos com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram melhor acabamento superficial (menores valores de rugosidade), se comparados aos painéis produzidos com o adesivo melamina formaldeído;
- Destaca-se que, nas três propriedades avaliadas (resistência à abrasão, dureza Janka e rugosidade superficial), quanto ao desempenho para pisos, os painéis dos doze tratamentos do planejamento II apresentaram valores estatisticamente equivalentes aos provenientes das três espécies de madeiras tropicais avaliadas, evidenciando a potencialidade dos painéis produzidos neste estudo para aplicação na indústria de pisos engenheirados;
- Nos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), todos os painéis analisados apresentaram características porosimétricas (área total de poros, densidade

aparente e porosidade) semelhantes às três espécies de madeira analisadas. Para a porosidade, característica porosimétrica mais importante, as três espécies de madeiras apresentaram porosidade na faixa de 22,6 a 34,5%, muito semelhante aos valores de porosidade obtidos para os painéis do planejamento II, que se situaram na faixa de 27,0 a 33,7%. A análise de porosimetria por intrusão de mercúrio confirmou a similaridade entre as três espécies de madeiras tropicais e os painéis dos doze tratamentos avaliados no planejamento II;

- Na análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), as imagens evidenciaram a semelhança entre os materiais analisados, em relação a interação tanto entre partículas quanto entre partículas e o adesivo. Isso mostra o bom desempenho do material casca de aveia como insumo alternativo para painéis de partículas com aplicação para pisos;
- Em relação ao desempenho para pisos, todos os painéis avaliados no planejamento II, apresentaram plenas condições para utilização como pisos engenheirados, justamente por apresentarem desempenho equivalente (e até superior, para algumas propriedades) às três espécies de madeira avaliadas, tradicionalmente utilizadas na fabricação de pisos maciços;
- Nessas condições, os painéis com 25% de casca de aveia e 11% de adesivo são os tratamentos que apresentaram melhor desempenho, pois atendem aos desempenhos físico, mecânico e para pisos. Esses painéis (com 25% de casca de aveia) também possuem menos material casca de aveia que os painéis com 50% deste material. Sabe-se que a casca de aveia possui altos teores de sílica, o que pode provocar maiores desgastes nas ferramentas de corte.

A partir das conclusões, foram sugeridos para estudos futuros:

- Como algumas das propriedades físico-mecânicas avaliadas no planejamento I apresentaram alguns resultados que não atenderam às normas nacionais e internacionais, pode ser adotado maior percentual de adesivo, como 15%, a fim de garantir que todas as condições experimentais avaliadas atendam aos requisitos normativos;
- Realizar ensaios específicos para determinar propriedades como absorção sonora, condutividade térmica e resistência térmica, para avaliar os desempenhos acústico e térmico

dos painéis produzidos e das três espécies de madeiras tropicais avaliadas neste estudo, para analisar se tais desempenhos são equivalentes;

- Fazer painéis de partículas multicamadas (com três camadas), onde as camadas externas são constituídas de partículas menores e a camada interna é constituída por partículas maiores. Analisar o desempenho físico-mecânico dos painéis multicamadas e comparar ao desempenho físico-mecânico dos painéis monocamadas, produzidos neste estudo;
- Realização de mais ensaios referentes a pisos de madeira, como ensaios de resistência ao risco, endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas, impacto da esfera de aço cadente e resistência a produtos manchadores. Estes testes mencionados são indicados para testar o desempenho dos revestimentos. Nestas condições, sugere-se também a utilização de um ou mais tipos de revestimento, a fim de comparar o desempenho do revestimento dos painéis a serem produzidos com os pisos engenheirados disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ALMEIDA, V. C. **Avaliação do potencial de uso de resíduos de madeira tropical para produção de painéis colados lateralmente – EGP**. 2013. 123 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE – ANSI. **A208.1: Particleboard**. Gaithersburg, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D-1037: Standard Test Methods of Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials**. West Conshohocken, PA, 1999.

_____. **ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken, PA, 2012.

AMICO, S. C. et al. Caracterização de fibras de sisal da região Nordeste do Brasil. **Materials Science**, Amsterdam, v. 2, p. 34-40, 2001.

ANDRADE, A. (coord.). **Análise tecnológica e econômica do setor brasileiro de pisos de madeira**. Piracicaba: ANPM, 2011. 69p.

ANDRADE, A.; JANKOWSKY, I. P. (coord.). **Pisos de madeira: características de espécies brasileiras**. Piracicaba: ANPM, 2015. 184p.

ANDRADE, A. et al. Setor brasileiro de Pisos de Madeira: Oportunidades e Ameaças. **Revista da Madeira**, n. 139, maio 2014.

ARAÚJO, L. C. R. **Caracterização química, térmica e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos**. 1992. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química e Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA

MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2009: ano base 2008**. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/wp-content/uploads/2014/02/2009.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. (2013). **Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012**. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3910>>. Acesso em: 14 set. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404**: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos - Procedimento. Rio de Janeiro, 1984. 10p.

_____. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

_____. **NBR 14810**: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 14810**: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 14535**: Móveis de madeira - Requisitos e ensaio para superfície pintada. Rio de Janeiro, 2008. 32p.

_____. **NBR 14810**: Painéis de partículas de média densidade. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 14833-1**: Revestimentos de pisos laminados melamínicos de alta resistência. Parte 1: Requisitos, características, classificações e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014. 44p.

_____. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil. Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE PISOS DE MADEIRA – ANPM. **Informações e estatísticas do setor**. Disponível em: <<http://www.anpm.org.br>>. Acesso em: 19 set. 2015.

ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL. **Notícias**: IBÁ nasce com a missão de dobrar a base florestal até 2020, de sete para 14 milhões de hectares com florestas plantadas. Maio de 2014. Disponível em: <<http://www.apreflorestas.com.br/noticias/florestal/1001/iba-nasce-com-a-missao-de-dobrar-a-base-florestal-ate-2020-de-sete-para-14-milhoes-hectares-com-florestas-plantadas>>. Acesso em: 09 set. 2015.

BARROS FILHO, R. M. **Painéis aglomerados a base de bagaço de cana de açúcar e resinas ureia formaldeído e melamina formaldeído**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – (UFOP – CETEC – UEMG), Ouro Preto, 2009.

BARBIRATO, G. et al. Painel aglomerado híbrido de casca de amendoim reforçado com partículas de madeira Itaúba. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 685-697, 2014.

BATISTA, D. C.; KLITZKE R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BERNARDI, R. **Reconstituição de chapas de aglomerado**. Dossiê Técnico, SENAI-RS, Centro Tecnológico do Mobiliário, 2006.

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**. 2011. 128 p. 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, 2011.

BERTOLINI, M. S. **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.

BERTOLINI, M. S. et al. Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus* sp. tratado com preservante CCA e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 2, p. 339-346, 2014.

BEZERRA, S. B. et al. Physical and Mechanical Characteristic of Particleboards Produced with Residues of Sugarcane and Stem Leaves of Bamboo Bonded with Castor Oil Adhesive. **Advanced Materials Research** (Online), v. 1088, p. 652-655, 2015.

BIDONE, F. R. A. **Metodologia e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

BORGES, D. C. et al. Reação de genótipos de *Avena spp.* a *Meloidogyne incognita* raça 4. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 34, n. 1, jan./fev. 2009.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science: an introduction**. 4. ed. Ames: Iowa State Press, 2003.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRITISH STANDARD – BS. **BS EN 312**: Particleboards – specifications. London, 2003.

CAIXETA, R. P. **Propriedades da madeira de *Eucalyptus*: classificação e seleção de genótipos utilizando marcador molecular e análise multivariada**. 2000. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

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

CAMPOS, C. I. **Produção e caracterização de MDF a partir de fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores**. 2005. 113 p. Tese (Doutorado) – 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, 2005.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. Estudo comparativo dos resultados de ensaio de tração perpendicular para MDF produzido em laboratório com fibras de pinus e de eucalipto utilizando ureia-formaldeído. **Matéria**, Rio de Janeiro. v. 9, n. 1, p. 32-34, 2004.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Propriedades de chapas de flocos fabricadas com adesivo de ureiaformaldeído e de taninos de casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden ou de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 5, p. 715-724, 2004.

CARNOS, B. **Madeira aglomerada: conceito e utilização**. Porto Alegre: SAGRA, 1988.

CARVALHO, A. G. et al. Efeito da adição de resíduos da poda de erva mate em painéis aglomerados. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 39, n. 1, p. 209-214, 2015.

CENTRO ANALÍTICO DE INSTRUMENTAÇÃO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - CENTRAL ANALÍTICA IQ/USP. **Microscopia eletrônica: varredura e transmissão – MEV e MET**. Disponível em: < http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=16 >. Acesso em: 06 maio 2016.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS - CIFLORESTAS. **Notícia:** Florestas plantadas abrem caminho para a rentabilidade no campo. Disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/conteudo.php?tit=florestas_plantadas_abrem_caminho_para_a_rentabilidade_no_campo&id=11888>. Acesso em: 05 set. 2015.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Homogeneous *Pinus* sp. particle boards reinforced with laminated composite materials. **Engenharia Agrícola** (Online), Jaboticabal, v. 36, n. 3, p. 558-565, 2016.

CLOUTIER, A. Oriented Strand Board (OSB): raw material, manufacturing process, properties of wood-base fiber and particle materials. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON SOLID WOOD PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGY, 1998. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SIF, 1998. p. 173-185.

DACOSTA, L. P. E. **Utilização de resíduos do processamento mecânico da madeira para fabricação de chapas de partículas aglomeradas.** 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada.** 2005. 150 f. Tese (Doutorado) - 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, 2005.

_____. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada.** Produtos Derivados da Madeira: síntese dos trabalhos desenvolvidos no LaMEM-SET-EESC-USP. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 73-92, 2008.

DUARTE, L. C. et al. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 30, n. 2, p. 3-15, 2003.

EUCATEX. **Pisos Laminados.** Disponível em: <<http://www.eucatex.com.br/pt/pisos/pisos-laminados/>>. Acesso: 12 ago. 2015.

FARIA, P. E. **Estudo sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro.** 2007. 204 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

FEIGENBAUM, A. V. **Controle de qualidade total: gestão e sistemas**. São Paulo: Makron Books, v. 1, 1994. 205 p.

FERRO, F. S. **Painéis OSB com madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção**. 2013. 101p. 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. Painéis de partículas monocamadas fabricados com resíduo de madeira e fibra de coco verde. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 175-182, 2015.

FOELKEL, C. “Edge Glued Panel” (Painel de madeira colado lateralmente). **PinusLetter**, n. 8, 2008. Disponível em: http://www.celso-foelkel.com.br/pinus_08.html . Acesso em: 16 set. 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS
STATISTICS DIVISION - FAO. **Statistics 2014: Faostat Forestry**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/download/F/FO/E>>. Acesso em: 09 set. 2015.

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.

FRANKLIN ADHESIVES AND POLYMERS. **Trinta princípios da colagem de madeira**. 2003. Disponível em: <<http://www.franklinadhesives.com>>. Acesso em: 09 fev. 2011.

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.

HASELEIN, C. R. et al. Resistência mecânica e à umidade de painéis aglomerados com partículas de madeira de diferentes dimensões. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 127-134, 2002.

HASELEIN, C. R.; PAULESKI, D. T. **Caderno didático da disciplina de tecnologia da madeira: parte II**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola** - safras de 2014 e 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201507_5.shtm>. Acesso em: 29 ago. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras**. Disponível em: <http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca>. Acesso em: 16 set. 2015.

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

_____. **Painéis de madeira**. Curitiba: FUPEF, 1998.

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

_____. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68-74, 2008.

IWAKIRI, S.; PEREIRA, S. J.; NISGOSKI, S. Influência da umidade, pressão e tempo de prensagem na produção de chapas de partículas de madeira aglomerada. **Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 18, n. 1, p. 29-36, 1999.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-ureia-formaldeído. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 323-328, out./dez. 2005.

_____. et al. Madeira de eucalipto é alternativa para piso engenheirado. **Revista da Madeira**, n. 112, abr. 2008.

JANKOWSKY, I. P. **Colagem de madeiras**. Piracicaba: ESALQ, 1988.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. 106 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

KELLY, M.W. A critical literature review of relationship between processing parameters and physical properties of particleboard. USDA Forest Service. **Forest Products Laboratory General Technical Report**, Madison, n. 10, p. 1-66, 1977.

KOLLMANN, F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of Wood science and technology: wood based materials**. New York: Springer-Verlag, 1975.

KOZAK, A. R.; MANESS, C. T. A system for continuous process improvement in wood products manufacturing. **Holz als Roh – und Werkstoff**, Berlin, v. 61, n. 2, p. 95-102, 2003.

LAHR, F. A. R. et al. Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 153-158, 2010.

LIMA, C. K. P. et al. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, 2007.

LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; VIEIRA, R. S. Aproveitamento de resíduos gerados no processamento de madeira de eucalipto. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Eds.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro: UFES, 2007. p. 255-290.

MACEDO, L. B. et al. Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** (Online), Campina Grande, v. 19, p. 674-679, 2015.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman, 1977.

_____. **Modern particleboard and dry-process fiberboard**. San Francisco: Miller Freeman, 1993.

_____. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p. 19-26, 1996.

MANTEGA, B. M.; ULIANA, L.R.; NOLASCO, A. M. **Pontos críticos de geração de resíduos em indústrias de pisos de madeira**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA USP, 20., 2012, São Paulo. Disponível

em: < http://www.pimads.org/documento_atividades/Poster%2001%20-%20SIICUSP.pdf>.
Acesso em: 15 set. 2015.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles and practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

MATA, V. L. G. **Caracterização de meios porosos: porosimetria, modelização 3D e tomografia seriada – aplicação a suportes catalíticos**. 1998. 304 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1998.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.27, p.121-156, 2008.

MELO, R. R. et al. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 449-460, out./dez. 2009.

MENDENS, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; IWAKIRI, S. A. A indústria brasileira de painéis de madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 71, p. 12-20, 2003.

MENDES, L. M. ***Pinus spp.* na produção de painéis de partículas orientadas**. 2001. 156 f. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MENDES, R. F. **Utilização do bagaço de cana de alambique na produção de painéis aglomerados**. 2008. 104 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 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, jun. 2010.

MONTEIRO, S. N. et al. Tenacidade ao entalhe por impacto Charpy de compósitos de polyester reforçados com fibras de piaçava. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 204-210, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 6. ed. Arizona: John Wiley & Sons Inc, 2005.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. London: Southern Illinois University Press, 1974.

MÜLLER, B.V. et al. Avaliação das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 4, p. 535-542, 2014.

NASCIMENTO, M. F. **CHP - chapas de partículas homogêneas**: madeiras do Nordeste do Brasil. 2003. 143 p. Tese (Doutorado) – 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, 2003.

NOCE, R. et al. Análise da tendência do Mercado internacional de aglomerado. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 2, p. 245-250, 2008.

OKAMOTO, T. Recent developments in wood-plastic composites-extrusion of wood based materials. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, v. 49, n. 6, p. 401-407, 2003.

OLIVEIRA, J. M. **Avaliação técnica e ergonômica de carteiras escolares confeccionadas com aglomerados de bagaço de cana de açúcar**. 2010. 130 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

OLIVEIRA, S. L. **Painéis aglomerados de bagaço de cana de açúcar**: caracterização visando ao uso na indústria moveleira. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

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

PEDRESCHI, R. **Aproveitamento do bagaço de cana da indústria sucroalcooleira na produção de painéis aglomerados**. 2009. 49 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PETERSON, R. W. Wood adhesives. **Forest Products Research Branch**, Ottawa, n. 1055, 1964.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. Nova York: Marcell Dekker, 1994.

REDDINGTON, C. L. et al. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. **Nature Geoscience Letter**. Publicado online: 16 set. 2015. Disponível em: < <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/full/ngeo2535.html>>. Acesso em: 17 set. 2015.

RIBEIRO, T. S. **Produção de painéis compensados de Pinus taeda com resina ureia-formaldeído utilizando diferentes extensores**. 2008. 20 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.

ROLLERI, A., ROFFAEL, E. Influence of the surface roughness of particleboards and their performance towards coating. **Ciencia Y Tecnologia**, v. 12, n. 2, p. 143-148, 2010.

ROSA, M. F. et al. Valorização de resíduos da agroindústria. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS - SIGERA, 2., 2011, Foz do Iguaçu. **Volume I – Palestras**. Disponível em: < <http://www.sbera.org.br/2sigera/obras/p12.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2015.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and factors affecting fiber properties. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A. L.; MATTOSO, L. H. C. (Ed.). **Natural polymers and agrofibers composites**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000. p. 115-134.

SÁ, J. P. G. Utilização da aveia na alimentação animal. **Circular**, Londrina - IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná), n. 87, 1995.

SALDANHA, L. K. **Alternativas tecnológicas para produção de chapas de partículas orientadas OSB**. 2004. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SAMLAIC, J. Os atuais problemas e as possibilidades dos adesivos para madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 374, p. 7-10, 1983.

SILVA, D. A. Florestas do Paraná: quadro desolador. **CREA-PR**, Curitiba, n. 31, p. 39-40, nov. 2004.

- SILVA, D. A. L. et al. Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 299-307, 2015.
- 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.
- SILVA, S. A. M. et al. Medium Density Particleboard (MDF) Produced with *Pinus caribaea* Fibers and Castor Oil Based Polyurethane Resin. **Advanced Materials Research**, v. 1025-1026, p. 13-16, 2014.
- SOUZA, A. M. et al. Screw Pullout Strength in Particleboards Manufactured with Waste of *Eucalyptus grandis* Wood Specie and Oat Hulls. **International Journal of Composite Materials**, v. 4, p. 162-167, 2014.
- TAKESHITA, S.; ANDRADE, A.; JANKOWSKY, I. P. Planejamento estratégico para o setor de pisos de madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 3, p. 237-242, 2011.
- TAMANINI, C.; HAULY, M. C. O. Resíduos agroindustriais para produção biotecnológica de xilitol. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 25, n. 4, p. 315-330, out./dez. 2004.
- TAMANINI, C. et al. Avaliação da casca de aveia para produção biotecnológica de xilitol. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 26, n. 2, p. 117-125, 2004.
- THOLE, V.; WEISS, D. Suitability of annual plants as additives for gypsum-bonded particleboards. **Holz als Roh und Werkstoff**, München, v. 50, n. 6, p. 241-252, 1992.
- TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991. 494 p.
- 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.
- VARANDA, L. D. et al. A influência das variáveis do lixamento tubular na qualidade de peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 23-32, 2010.

VARANDA, L. D. et al. Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio em painéis de partículas. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v. 13, n. 32, p. 81-90, 2012.

VARANDA, L. D. et al. Oat hulls as addition to high density panels production. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 6, p. 1355-1361, 2013.

VARANDA, L. D. et al. Evaluation of modulus of elasticity in static bending of particleboards manufactured with *Eucalyptus grandis* wood and oat hulls. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 36, p. 405-411, 2014.

VICK, C. B. **Adhesive bonding of wood materials**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1999.

WEBER, C. **Estudo sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

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, abr./jun. 2015.

WEBSTER, F. H. **Oats chemistry and technology**. Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 1986.

WU, Q. Particleboard from Sugarcane Bagasse for Value-added Applications. **Louisiana Agriculture**, 2003. Disponível em:
<<http://www.lsuagcenter.com/en/communications/publications/agmag/Archive/2003/Summer/Particleboard+from+Sugarcane+Bagasse+for+Valueadded+Applications.htm>>. Acesso em: 21 set. 2015.

APÊNDICES

Aqui são apresentados os resultados (forma gráfica) de validação da ANOVA: normalidade dos resíduos (teste de Anderson-Darling), homogeneidade de variâncias dos resíduos entre tratamentos (teste de Bartlett) e independência dos resíduos (gráfico de resíduos x ordem), para os dois planejamentos delineados e avaliados. Assim como mencionado na metodologia, o nível de significância adotado nos testes foi de 5%.

APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DA ANOVA PARA O PLANEJAMENTO I (20 TRATAMENTOS)

As Figuras de 27 a 37 ilustraram os resultados dos testes de validação da ANOVA do primeiro planejamento experimental. No planejamento I, as propriedades físicas e mecânicas investigadas foram: inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água (I 2h e I 24h, respectivamente), absorção de água após 2 e 24 horas de imersão em água (A 2h e A 24h, respectivamente), densidade (D), parâmetro razão de compactação (RC), módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), ambos na flexão estática, resistência à tração perpendicular (TP) e resistência ao arrancamento de parafuso para face e topo do painel (APf e APt, respectivamente).

Figura 27 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o I 2h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 28 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o I 24h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 29 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a A 2h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 30 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a A 24h: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 31 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a D: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 32 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a RC: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 33 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o MOE: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 34 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o MOR: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 35 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a TP: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 36 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o APf: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 37 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para o APt: normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

APÊNDICE B – VALIDAÇÃO DA ANOVA PARA O PLANEJAMENTO II (12 TRATAMENTOS)

As Figuras de 38 a 41 ilustraram os resultados dos testes de validação da ANOVA do segundo planejamento experimental. Para o planejamento II, as propriedades investigadas foram: resistência à abrasão (Ab), dureza Janka (DJ), energia absorvida no impacto (EAI) e rugosidade superficial (Ra).

Figura 38 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a resistência à abrasão (Ab): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 39 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a dureza Janka (DJ): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 40 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a energia absorvida no impacto (EAI): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 41 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a rugosidade superficial (R_a): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

APÊNCIDE C – VALIDAÇÃO DA ANOVA REFERENTE À COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES PARA PISOS DOS PAINÉIS (12 TRATAMENTOS) COM AS PROPRIEDADES DAS MADEIRAS MACIÇAS

As Figuras de 42 a 45 ilustraram os resultados dos testes de validação da ANOVA da composição entre os tratamentos do planejamento II e as três espécies de madeira maciça. As propriedades investigadas foram: resistência à abrasão (Ab), dureza Janka (DJ), energia absorvida no impacto (EAI) e rugosidade superficial (Ra).

Figura 42 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a resistência à abrasão (Ab): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 43 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a dureza Janka (DJ): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 44 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a energia absorvida no impacto (EAI): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.

Figura 45 - Gráficos dos resíduos da ANOVA para a rugosidade superficial (Ra): normalidade (a), homogeneidade de variâncias (b) e independência (c) dos resíduos.