UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

VITOR UEMURA DA SILVA

Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na
produção de painéis de partículas

São Carlos

2018

VITOR UEMURA DA SILVA

Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na
produção de painéis de partículas

VERSÃO CORRIGIDA

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como requisito para a obtenção do
Título de Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais.

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

Orientador: Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos

2018

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S586v Silva, Vitor Uemura da
Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na produção de painéis de partículas / Vitor Uemura da Silva; orientador Francisco Antonio Rocco Lahr. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - 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, 2018.

1. Maravalha. 2. Paineis de partículas. 3. Resíduos sólidos. 4. Derivados da madeira. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **VITOR UEMURA DA SILVA.**

Título da dissertação: "Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na produção de painéis de partículas".

Data da defesa: 04/02/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

Prof. Dr. **Maximiliano dos Anjos Azambuja**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

APROVADO

Prof. Dr. **Amós Magalhães de Souza**
(Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri/UFVJM)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:
Prof. Associado **Rafael Salomão**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

*Aos ventos, que me trouxeram até
aqui. À natureza e toda sua
perfeição.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos deuses e deusas desse universo infinito; agradeço à grande mãe natureza que, com perfeição, faz e desfaz tudo o que temos diante de nossos olhos nessa terra.

Agradeço aos familiares e amigos que preenchem de alegrias a minha passagem por esta existência.

Agradeço aos professores e técnicos do LAMEM; agradeço especialmente ao Rocco pela confiança, amizade e orientação, e agradeço também ao grande Cidão (onde quer que esteja pescando agora) pela amizade e pela imensa ajuda durante a produção dos painéis e os ensaios.

Agradeço de coração a todas e todos que de alguma forma fizeram parte desta etapa de minha vida.

“Tudo que temos de decidir é o que fazer
com o tempo que nos é dado”

J. R. R. Tolkien (1954)

RESUMO

SILVA, V. U. **Viabilidade técnica do reaproveitamento da maravalha de forma integral na produção de painéis de partículas.** 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A cadeia produtiva da madeira gera uma grande quantidade de resíduos sólidos em todos os seus níveis, desde o plantio até as subseqüentes etapas de produção. Esses resíduos recebem destinos diferentes de acordo com fatores ligados à regionalidades, existência de mercado para absorvê-los, quantidade gerada, porte da empresa ou estabelecimento que os gera, e outras variáveis; existem no cenário nacional, duas tendências observadas na pesquisa para lidar com os resíduos de madeira: uma delas é o descarte ao ar livre ou a queima sem fins energéticos; e outra tendência é a queima para produção de energia. Apesar de se tratar de uma alternativa bastante usual, a queima desse material libera o carbono de volta para a atmosfera e não se adequa a ordem de prioridade de gestão de resíduos sólidos estabelecida por lei (12.305/2010), além de encerrar o ciclo econômico da madeira, que poderia ainda ser reciclada e comercializada sob a forma de novos produtos. Com isso, decidiu-se utilizar a maravalha, que é um dos resíduos mais comuns do processamento da madeira, como base para a produção de painéis de partículas. Além disso, suprimiu-se a etapa de homogeneização das mesmas, ou seja, elas foram utilizadas de forma integral, conforme recolhidas do chão da serraria, sem passar por um moinho e peneira. Foram utilizadas duas resinas poliuretanas de baixo impacto ambiental, e uma resina de ureia-formaldeído, e os painéis foram produzidos em alta e média densidade, com maravalhas provenientes da madeira de *Pinus Elliottii*, *Pinus Taeda*, e também de *Eucalyptus urograndis*. Além dos ensaios exigidos por norma, foram realizados ensaios de colorimetria, rugosidade, condutividade térmica, porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados comprovaram a viabilidade técnica dos painéis, e mostraram que com alguns ajustes é possível melhorar as propriedades dos mesmos para que eles fiquem de acordo com as exigências de sua aplicação final.

Palavras-chave: Maravalha. Painel de partículas. Resíduos sólidos. Derivados da madeira.

ABSTRACT

SILVA, V. U. **Technical viability of particleboards made of whole wood shavings.** 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Wood processing generates huge amounts of solid residues throughout its commercial cycle from silviculture to sawn-wood production, and the destination given to such residues is influenced by: the existence of a local market capable of absorbing it; existence of a recycling culture; technology available to transform the material into other products or energy to be imputed back to the production process; and other factors. The main trend in Brazil follows two distinct lines, in which the residues are sometimes discarded *in natura* or even burned without any regards to energy that is being wasted, or the residues are used to energy production. Besides being a good alternative, incinerating the residues to produce energy may not be the best way to deal with them since the carbon stored in the wood is released back to the atmosphere, and this action doesn't conform to the national policy on solid residues which prioritizes recycling of the material. Raw wood shavings from *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* and *Eucalyptus urograndis* were used to produce the particleboards, they were collected from the sawmill floor and used without any processing to regulate the particle dimension, they were only divided into *Pinus* and *Eucalyptus*; two polyurethane and one urea-formaldehyde resin were chosen to be part of the experiment. Besides the usual tests suggested by the standards, this research also evaluated the particleboards on surface roughness, spectrophotometry, heat conduction, percentage of pores and electronic microscopy. Technical viability of the particleboards was confirmed by the tests applied, with a few refinements to be considered in order to adequate the particleboard to the final application.

Keywords: Wood shavings. Particleboard. Solid residues. Wood products.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição das partículas no painel.....	31
Figura 2 – Maravalha de <i>Pinus</i>	32
Figura 3 – Geração e estocagem das partículas	38
Figura 4 – Resinas Poliuretanas de baixo impacto ambiental.....	40
Figura 5 – Batedeiras	40
Figura 6 – Molde para a formação do colchão	41
Figura 7 – Painéis prontos após o tempo de cura da resina	42
Figura 8 – Plano de corte dos corpos-de-prova de flexão estática.....	44
Figura 9 – Plano de corte dos corpos-de-prova de 50 mm de lado.....	45
Figura 10 – Máquina EMIC e ensaio de flexão estática	47
Figura 11 – Ensaio de tração perpendicular.....	47
Figura 12 – Ensaio de inchamento em espessura 2 horas e 24 horas	48
Figura 13 – Ensaio de arrancamento de parafuso (topo e face).....	48
Figura 14 – Colorímetro e ensaio de colorimetria	49
Figura 16 – Rugosímetro e ensaio de rugosidade	53
Figura 17 – Preparação e ensaio de condutividade térmica.....	54
Figura 18 – Ensaio MEV	56
Figura 19 – Corpo-de-prova e detalhes do ensaio de porosimetria	57
Figura 20 – Mapa de interpretação dos gráficos de resultados.....	59
Figura 21 – Imagens de MEV com aproximação de 200X.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos sólidos	30
Tabela 2 – Plano de produção dos painéis	36
Tabela 3 – Tratamentos dos painéis produzidos	37
Tabela 4 – Ensaios e dimensões dos respectivos corpos-de-prova	43
Tabela 5 – Divisão dos corpos-de-prova por ensaio	46
Tabela 6 – Lista de equipamentos.....	58
Tabela 7 – Resultados dos ensaios da norma ABNT 14.810-2:2013	60
Tabela 8 – Resultados dos ensaios da norma ABNT 14.810-2:2013	61
Tabela 9 – Requisitos da norma ABNT 14.810-2:2013	62
Tabela 10 – Requisitos da norma ANSI 208.1:1999	62
Tabela 11 – Requisitos da norma EN 312:2013	63
Tabela 12 – Classificação dos painéis de maravalha segundo os requisitos de normas	66
Tabela 13 – Dados do ensaio de condutividade térmica.....	70
Tabela 14 – Dados da análise de rugosidade superficial	73
Tabela 15 – Classes de rugosidade das amostras.....	75
Tabela 16 – Características porosimétricas das amostras	83
Tabela 17 – Dados do ensaio de colorimetria.....	85
Tabela 18 – Cromaticidade e Ângulo de tinta	86
Tabela 19 – Classificação das cores dos tratamentos	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	–	American National Standard
APf	–	Arrancamento de parafuso de face
APt	–	Arrancamento de parafuso de topo
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
CP	–	Corpo-de-prova
EN	–	European Standard
IE	–	Inchamento em espessura
MEV	–	Microscopia Eletrônica de Varredura
MOE	–	Módulo de elasticidade
MOR	–	Módulo de resistência à flexão estática
PUI	–	Poliuretana Imperveg
PUK	–	Poliuretana Kehl
TP	–	Tração perpendicular
UF	–	Ureia-formaldeído

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVO	27
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
4 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 Partículas	37
4.2 Resina	39
4.3 Conformação	41
4.4 Produção dos corpos de prova.....	43
4.5 Ensaios da norma	45
4.6 Colorimetria	49
4.7 Rugosimetria	52
4.8 Condutividade térmica	54
4.10 Porosimetria por intrusão de mercúrio	56
4.11 Lista de equipamentos.....	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 Ensaios da norma	60
5.2 Propriedades térmicas	70
5.3 Ensaio de rugosidade superficial.....	72
5.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	76
5.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio	80
5.6 Colorimetria	84
6 CONCLUSÃO	91
REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da madeira gera uma grande quantidade de resíduos sólidos em todas as suas etapas produtivas, desde o plantio até as consecutivas transformações que dão origem ao produto final. Devido a esse alto volume de resíduos, faz-se necessário um plano de gestão dos mesmos para que esse material possa ser transformado e reinserido no ciclo econômico da madeira.

Existem diversas aplicações para os resíduos e elas variam de acordo com alguns fatores como: tecnologia e capital disponíveis, localização dos centros geradores, existência de mercado específico para os resíduos, regionalidades que possam influenciar a demanda pelo material, maturidade do mercado com relação às práticas de reaproveitamento de resíduos, entre outras.

No Brasil observam-se dois cenários comuns quando o assunto é a destinação dos resíduos sólidos de madeira. Um primeiro caso, que na maioria das vezes ocorre em pequenas serrarias afastadas dos grandes centros, os resíduos são empilhados e deixados na natureza, ou então queimados ao ar livre. No segundo caso, geralmente onde há um processo industrial envolvido, são utilizados para a produção de energia através da queima (energia que retorna para o processo produtivo) ou são recolhidos por empresas especializadas.

Apesar de se tratar de uma boa aplicação para os resíduos, a produção de energia libera novamente o carbono na atmosfera em um tempo muito menor comparado a alternativas como, por exemplo, a reciclagem (reutilização dos resíduos como matéria prima para a produção de produtos derivados da madeira), que mantém o carbono fixado e ainda movimenta a economia do setor ligado a esses produtos. Também, segundo a legislação nacional, existe uma ordem de prioridade no gerenciamento dos resíduos sólidos que favorece as alternativas que reciclam o material àquelas consideradas como uma disposição final.

A maravalha é um dos principais resíduos do processamento mecânico da madeira, gerada durante o aplanamento de tábuas, apresenta um formato característico de fácil identificação. No contexto dos painéis de partículas, existe uma escassez de pesquisas que a utilizem como matéria-prima principal, e observou-se também que, na literatura existente, os trabalhos têm em sua metodologia uma etapa de homogeneização, na qual as maravalhas são colocadas em um moinho com peneira para que as partículas sejam reduzidas e adquiram

pouca variação nas dimensões, e também para eliminar eventuais pontos de fragilidade da partícula ou locais de possível acúmulo de resina. O processo de homogeneização como um todo, exige uma boa quantidade de energia, e sua eventual supressão acarretaria em redução do custo de produção dos painéis.

Assim, o presente trabalho de pesquisa foi elaborado visando aumentar a base de conhecimento relacionada à maravalha (utilizada de forma integral) como matéria-prima na produção de painéis de partículas para que se possa ter um melhor entendimento do material e de suas possíveis aplicações.

2 OBJETIVO

Com base no cenário apresentado na introdução, definiu-se o objetivo geral da pesquisa conforme descrito abaixo:

Avaliar a viabilidade técnica da produção de painéis de partículas sem o processo de homogeneização da maravalha, ou seja, utilizando a partícula de forma integral, sem ser submetida à redução (por intermédio de moinho) ou separação por classe de tamanho. Com isso, é possível se ter uma visão geral do desempenho físico e mecânico do produto final para que se possa pensar em possíveis aplicações.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo dados apresentados no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012), elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente, a silvicultura destinada à produção de madeira em toras (utilizada para as atividades de produção de carvão vegetal, papel e celulose, lenha e outras finalidades) gera uma grande quantidade de resíduos sólidos. No documento foram levadas em conta apenas duas etapas da cadeia produtiva (colheita e processamento primário), sem considerar as possíveis transformações secundárias (móveis, construção civil, pallets, embalagens etc), e constatou-se que, de uma produção total de 122.159.595 m³/ano, são gerados 85.574.465 m³/ano de resíduos de madeira, o que corresponde a dizer que 70% do volume da produção não são devidamente transformados em produto final (madeira serrada). Alguns pesquisadores (BRITO, 1995; GERWING, 2001; FAGUNDES, 2003; VIDAL 1997) desenvolveram trabalhos em pequenas serrarias brasileiras com o objetivo de quantificar o rendimento destes estabelecimentos quanto ao aproveitamento da madeira, e os resultados de suas pesquisas mostraram que cerca de 54% da matéria prima acabam se tornando resíduo.

Conforme apontado no documento preparado por Goble e Peck (2013) para a Forest and Wood Products Australia, os resíduos do processamento da madeira têm diversas aplicações, tais como: combustível e iniciador de chamas em fornos de cerâmica; matéria-prima para a indústria de papel e celulose; agente de alteração de solos; auxiliares em processos de compostagem; geração de energia térmica, elétrica ou cinética através da queima; podem ser utilizados como cama em criações de animais (granjas e estábulos principalmente); fonte de polímeros orgânicos; isolamento térmico ou acústico; produção de produtos duráveis de maior valor agregado (painéis de partículas); podem ser transformados em pellets ou briquetes e comercializados. O destino desses resíduos geralmente depende da quantidade em que são produzidos, dos recursos disponíveis para lidar com essa problemática, e também da existência de tecnologia capaz de transformar esses resíduos e absorvê-los como matéria-prima ou fonte de energia em outros processos.

No Brasil, segundo o relatório anual do IBÁ (2017), a atividade industrial ligada ao setor de árvores plantadas gerou 14,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos de madeira, dos quais 66% foram destinados à geração de energia elétrica por intermédio da queima em caldeiras para acionamento de turbinas. Em um estudo realizado por Wiecheteck (2009), encomendado como parte dos projetos do Ministério do Meio Ambiente transparece uma

tendência por parte do governo brasileiro em incentivar a utilização dos resíduos sólidos de madeira na produção de energia.

Existem também pesquisadores que realizaram estudos de Inventário de Ciclo de Vida (LCI) da produção de painéis de partículas, além de documentos que tratam especificamente dos produtos derivados da madeira pelo viés do ciclo do carbono, e estes estudos mostram que: a produção de painéis é uma atividade que contribui positivamente com relação à pegada de carbono, pois o painel armazena bastante desse elemento e pode ser facilmente considerado como um fixador, mantendo-o aprisionado por 10 ou até 80 anos (tempo de uso), e por cerca de mais 100 anos até a decomposição da madeira após o descarte; a substituição de produtos à base de derivados de petróleo por produtos derivados da madeira também contribui para a minimização dos impactos ambientais pois a madeira é um matéria-prima renovável. (RIVELA, 2006; WILSON, 2010; INGERSON, 2009).

A Lei 12.305/2010, em seu artigo 9º, estabelece uma ordem de prioridade para gerenciamento dos resíduos sólidos conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos sólidos

1	Não geração
2	Redução
3	Reutilização
4	Reciclagem
5	Tratamento dos resíduos sólidos
6	Disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos

Fonte: Adaptado da Lei 12.305/2010

Ao analisar paralelamente os itens desta tabela com as possíveis aplicações dos resíduos sólidos de madeira, é possível inferir que sua utilização como matéria-prima na produção de um novo produto se apresenta como uma forma de reciclagem, enquanto que a

queima deste mesmo material para a produção de energia está mais relacionada à disposição final ambientalmente adequada, pois será novamente reduzido a seus elementos básicos.

Um grande número de pesquisadores (GAMAGE, 2008; IWAKIRI, 2017; FIORELLI, 2015; CHRISTOFORO, 2015; SAM-BREW, 2017; NASCIMENTO, 2016) vêm, ao longo do tempo, apresentando trabalhos a respeito do uso de resíduos sólidos para a produção de painéis de partículas, o que indica que a comunidade científica está inclinada a construir uma base de conhecimento que ampare as iniciativas de reutilização deste tipo de excedente em um ambiente industrial. Tais pesquisas buscam variar os parâmetros de produção dos painéis (resina, partícula, densidade etc) com o objetivo de avaliar as características físicas e mecânicas resultantes e propor aplicações baseadas nos resultados encontrados.

A norma brasileira ABNT 14.810-2:2013 define painel de partícula de média densidade como sendo aquele constituído de partículas de madeira, aglutinadas com resina termofixa, que se consolida sob a ação conjunta de calor e pressão. Além disso, os painéis recebem classificações secundárias conforme o modo como eles são construídos.

O termo "homogêneo" é atribuído levando-se em conta a distribuição das partículas na estrutura do painel, que no caso deste estudo, é constituído de uma única camada. A Figura 1 mostra diferentes configurações dessa distribuição.

Figura 1 – Distribuição das partículas no painel

Fonte: Autoria própria baseada nas notas de aulas de Iwakiri (2000)

A maravalha (do inglês *wood shavings*) foi definida por Moslemi (1935) como sendo uma partícula fina formada em processos como o aplanamento e o desengrosso da madeira, onde uma lâmina retira o material no mesmo sentido da grã com o objetivo de tornar a superfície plana; o resíduo formado se caracteriza por apresentar um gradiente de espessura e também por se enrolar no seu lado mais fino. Quanto à geometria, Maloney (1977) coloca que se trata de uma partícula sem dimensões exatas; o autor utiliza um moinho com peneiras de diferentes medidas para reduzir, homogeneizar e classificar as amostras antes da produção dos painéis, e depois apresenta os resultados de acordo com cada faixa de dimensões das partículas. Um exemplo de maravalha de *Pinus* está representado na Figura 2, a seguir:

Figura 2 – Maravalha de *Pinus*

Fonte: Autoria própria

A literatura apresenta alguns trabalhos que utilizam maravalha para a produção de painéis (FIORELLI, 2014; DOS SANTOS, 2014; HAZRATI-BEHNAGH, 2016; CABRAL, 2017), e nota-se que eles apresentam em suas metodologias o processo de homogeneização das partículas através do uso de moinhos e peneiras classificadoras.

A produção de resinas e adesivos voltados para a indústria de compósitos de madeira evoluiu de acordo com as exigências comerciais de cada época. No início a produção era bastante artesanal, então o tempo de cura não tinha tanta influência na escolha da resina,

porém, com as mudanças nos modelos produtivos, esse tempo de cura passou a ser um fator de alta importância; outras necessidades, como a resistência à umidade ou outras características que se queria presente nos painéis, também influenciaram nesse uso; mais recentemente, os fatores ambientais são os predominantes na escolha da resina, impulsionando o uso de resinas de baixo impacto ambiental e impondo regulamentações mais estritas quanto ao uso de formaldeído (ORMONDROYD, 2015; CONNER, 2017).

Uma das resinas mais utilizadas na produção de painéis de madeira é a ureia-formaldeído (UF), que apresenta vantagens como: baixo custo; é pouco inflamável; possui boas propriedades térmicas; não altera a cor da madeira; e confere boas características mecânicas ao compósito. Porém, trata-se de uma resina muito susceptível à umidade, e também possui o problema da liberação de formaldeído durante e após a sua produção, um problema sério em relação a esse composto químico, que vem sendo alvo de discussões em diversos países com políticas ambientais e de saúde mais rígidas (ORMONDROYD, 2015; CONNER, 2017; ECHA, 2017).

Existem resinas isentas de formaldeído, como as resinas poliuretanas (PU), nas quais parte do polímero (poliol) é formada a partir de componentes vegetais provenientes de fontes renováveis como o milho, mamona, soja e outros. Essas resinas conferem boas características físicas e mecânicas aos painéis, e também possuem boa resistência à ação da umidade (NASCIMENTO, 2018; VARANDA, 2018; FIORELLI, 2014).

A qualidade da interação entre resina e madeira depende de fatores como: espécie; densidade; orientação da grã; qualidade da superfície; entre outros. Quando se faz um estudo da interação entre madeira e adesivo levando-se em conta a rugosidade superficial, nota-se que a força de interação é maior para superfícies com valores de rugosidade mais altos, pois há uma maior penetração de adesivo e a área de contato consequentemente aumenta (HIZIROGLU, 2005; SATOSHI, 2010; HIZIROGLU, 2014).

Pode-se medir a rugosidade superficial em termos de valores de Ra ou Rz, sendo que o primeiro é mais comumente utilizado na América do Norte, e o segundo tem maior utilização no continente Europeu; há porém, métodos para se calcular os valores de um a partir do outro. Ra é determinado por um algoritmo que mede o comprimento médio entre picos e vales e a linha média da superfície na qual o equipamento faz a varredura, neutralizando os aqueles que se afastam muito dessa linha para que não haja impacto significativo nos resultados (FREE, 2015; NBR 4287, 2002).

Uma das possíveis aplicações para painéis de partículas de madeira é como parte do sistema de isolamento térmico feito em construções do tipo wood-frame, pois a madeira é um material poroso que não possui elétrons livres em quantidades significativas para um bom transporte de energia, e isso acarreta em baixos níveis de condutividade térmica, que é a habilidade do material transferir calor quando submetido a um gradiente de temperatura (KOLLMANN, 1968; CALISTER, 2012; MORESCHI, 2010).

Por meio da revisão bibliográfica, notou-se que há uma grande quantidade de resíduos de madeira que podem ser transformados em novos produtos e reinseridos no mercado; dentre esses resíduos está a maravalha, que encontra pouca aplicação como matéria-prima para a produção de painéis de partículas, além do fato de que quando utilizada, ela é homogeneizada para não apresentar muita variação dimensional. Com isso, o presente trabalho busca explorar esse tema pouco pesquisado utilizando a maravalha de forma integral.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de produção laboratorial de painéis de partículas não se alterou muito ao longo do tempo; claramente existem muitas diferenças e peculiaridades nesse processo produtivo, mas ao analisar a literatura existente nota-se que ela tem como base o trio: partículas; resina; e prensa. Muitos outros fatores podem variar como, por exemplo, a geometria, orientação e quantidade de partículas; tipos, quantidade e proporção de resina; temperatura e tempo de prensagem; adição de outros materiais; umidade, densidade e espécie de origem da madeira utilizada; etc. Devido à essa diversidade, buscou-se integrar a metodologia encontrada em livros clássicos da área, tais como (MOSLEMI, 1974; MALONEY, 1977), às metodologias mais recentes encontradas nos trabalhos de (OLMOS, 1994; BERGLUND, 2005; FIORELLI, 2014), incluindo-se pesquisas como as de (NASCIMENTO, 2018; VARANDA, 2018; BERTOLINI, 2015), que foram realizadas no mesmo local e utilizando os mesmos recursos disponíveis para este estudo.

Com isso, foi possível formular um planejamento para a produção dos painéis de partículas, conforme mostrado na Tabela 2, e também definir os tratamentos (Tabela 3):

Tabela 2 – Plano de produção dos painéis

	<i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> (lote misto)		
Espécies utilizadas	<i>Eucalyptus urograndis</i> (híbrido de <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>)		
Dimensões nominais	28 cm x 28 cm x 1 cm		
Volume do painel	784 cm ³		
Densidade nominal	Média – entre 551 kg/m ³ e 750 kg/m ³ Alta – acima de 750 kg/m ³		
Quantidade de partículas	Média densidade = 560g Alta densidade = 720g		
Resinas	PU vegetal Imperveg	PU vegetal Kehl	Ureia-formaldeído
Quantidade de resina por painel	11% da massa das partículas e mais 4% para compensar a perda referente à resina que adere às paredes do misturador		
Número de repetições	6 painéis de cada tratamento		

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Tratamentos dos painéis produzidos

Maravalha de <i>Pinus</i>		
T1	Resina PU Imperveg	Média densidade
T2	Resina PU imperveg	Alta densidade
T3	Resina PU Kehl	Média densidade
T4	Resina PU Kehl	Alta densidade
T5	Resina ureia-formaldeído	Média densidade
T6	Resina ureia-formaldeído	Alta densidade
Maravalha de <i>Eucalyptus</i>		
T7	Resina PU Imperveg	Média densidade
T8	Resina PU imperveg	Alta densidade
T9	Resina PU Kehl	Média densidade
T10	Resina PU Kehl	Alta densidade
T11	Resina ureia-formaldeído	Média densidade
T12	Resina ureia-formaldeído	Alta densidade

Fonte: Autoria própria

A seguir estão descritos os elementos constituintes e as etapas de produção dos painéis.

4.1 Partículas

As partículas de *Pinus* foram geradas através do processo de aplanamento das madeiras de um lote misto de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* provenientes de uma fazenda da empresa Berneck localizada no Estado de Santa Catarina. Tratava-se de madeira seca em estufa até a umidade em torno de 12%, sem tratamento químico, cortada em peças de 8,9 cm x 3,8 cm x 300 cm que foi passada por uma desgrossadeira (INVICTA) com faca de 40 cm de largura e altura máxima de corte de 25 cm. As maravalhas resultantes deste processo foram

devidamente recolhidas e estocadas em tambores herméticos para diminuir o contato com a atmosfera e protegê-las das variações de temperatura e umidade do ambiente externo.

As partículas provenientes da madeira de *Eucalyptus urograndis* (híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*) foram geradas da mesma maneira, utilizando-se peças sem tratamento, secas, com teor de umidade também em torno de 12%, a partir de toras que foram esquadrejadas até as dimensões de 8,9 cm x 3,8 cm x 180 cm antes de serem aplanadas. As partículas também foram estocadas em tambores, protegidas das intempéries.

A Figura 3 abaixo mostra o processo de geração das partículas e os tambores utilizados para estocar o material.

Figura 3 – Geração e estocagem das partículas

Fonte: Autoria própria

Não foi feita nenhuma redução e nem separação (homogeneização) das partículas; elas foram utilizadas de maneira integral, conforme recolhidas do chão da serraria do laboratório; fez-se somente a distinção entre *Pinus* e *Eucalyptus*.

4.2 Resina

O presente estudo utilizou 3 resinas separadamente, sendo duas delas à base de Poliuretano e a outra à base de ureia-formaldeído; com isso foi possível avaliar a influência de cada uma nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

A resina UF (fornecida pela SI Group) tem ph entre 7 e 8,5 e um teor de sólidos que pode variar de 50% até 65%; é largamente utilizada pela indústria de painéis devido ao baixo custo e boa resistência mecânica conferida, porém, é bastante vulnerável à ação da umidade e altas temperaturas, sendo utilizada somente para aplicações internas (MALONEY, 1977).

As resinas poliuretanas possuem ph ligeiramente básico, variando entre 7 e 8 (que depende da safra dos óleos vegetais) e um teor de sólidos de 100% (tanto poliol quanto isocianato). O poliol é feito a partir de fonte natural e renovável, sem adição de solventes e garantem boa impermeabilidade e alta resistência química e mecânica. Ambas as fabricantes (Kehl e Imperveg) produzem a resina em versão bicomponente e disponibilizam informações técnicas em seus catálogos. A Kehl forneceu o aglomerante AG101-A e AG101-B (Figura 4a), e a Imperveg forneceu o produto AGT1315-A e AGT1315-B (Figura 4b).

Figura 4 – Resinas Poliuretanas de baixo impacto ambiental

Fonte: Autoria própria

As resinas bicomponentes foram preparadas na proporção de 1:1 (pré-polímero e polioli) utilizando-se uma balança de precisão e um recipiente plástico inerte, de acordo com as quantidades calculadas no plano de produção mostrado anteriormente na Tabela 2 (FERRO, 2015; VARANDA, 2018). A resina UF não necessitou de pré-preparo, pois se trata um produto monocomponente.

A encolagem foi feita com o auxílio de batedeiras industriais (LIEME BP-12 SL e G. PANIZ BP 38C) conforme mostrado na Figura 5; a adição de resina foi feita gradualmente e o misto de resina e partículas foi processado por cerca de 5 minutos.

Figura 5 – Batedeiras

Fonte: Autoria própria

4.3 Conformação

Após a encolagem, o composto formado foi colocado em uma forma quadrada com aresta de 28 cm (Figura 6) na qual ocorreu a pré-prensagem com cerca de 0,013 Mpa para que o material fosse condensado na forma básica do painel (chamado de colchão). Em seguida, o colchão foi encaminhado à prensa (marca Marconi modelo MA 098/50) e submetido à uma pressão de 3,5 Mpa por um intervalo de tempo de 10 minutos. A temperatura utilizada na prensa foi de 100 °C para a resina à base de poliuretano, e 130 °C para a resina de ureia-formaldeído.

Figura 6 – Molde para a formação do colchão

Fonte: Autoria própria

Depois disso a pressão foi liberada e os painéis foram colocados em posição vertical para que o processo de cura se completasse, o que levou aproximadamente 72 horas em uma atmosfera não controlada. A Figura 7 mostra os painéis prontos, e também as dimensões finais de um painel de *Pinus* (abaixo a esquerda) e um de *Eucalyptus* (abaixo a direita) após a cura.

Figura 7 – Painéis prontos após o tempo de cura da resina

Fonte: Autoria própria

4.4 Produção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados levando-se em consideração as diretrizes existentes no documento normativo ABNT NBR 14.810:2013 e utilizando os equipamentos disponíveis na serraria do laboratório. A Tabela 4 apresenta os ensaios e a dimensão dos seus respectivos corpos-de-prova.

Tabela 4 – Ensaios e dimensões dos respectivos corpos-de-prova

Ensaio	Dimensão do CP
Teor de umidade	Painel inteiro – 280 mm x 280 mm
Densidade	50 mm x 50 mm
Inchamento 2h e 24h	50 mm x 50 mm
Tração perpendicular	50 mm x 50 mm
Flexão estática	250 mm x 50 mm
Arrancamento de parafuso – topo e face	50 mm x 50 mm
Colorimetria	Painel inteiro – 280 mm x 280 mm
Rugosidade	Painel inteiro – 280 mm x 280 mm
Microscopia eletrônica de varredura	15 mm x 15 mm
Porosimetria por intrusão de mercúrio	14 mm x 23 mm
Condutividade térmica	50 mm de diâmetro

Fonte: Autoria própria

O plano de corte dos CPs está mostrado na Figura 8. Primeiro o painel foi dividido em 5 corpos-de-prova de 250 mm por 50 mm para serem utilizados no ensaio de flexão estática.

Figura 8 – Plano de corte dos corpos-de-prova de flexão estática

Fonte: Autoria própria

Após o ensaio de flexão foram cortados os outros corpos-de-prova de 50 mm de lado utilizados nos demais ensaios; cada painel deu origem à 10 CPs conforme ilustrado na Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Plano de corte dos corpos-de-prova de 50 mm de lado

Fonte: Autoria própria

4.5 Ensaaios da norma

A Tabela 5 mostra como foi feita a divisão dos CPs para cada ensaio seguindo a numeração estabelecida anteriormente na Figura 9. O CP para o ensaio de MEV não consta nessa tabela porque ele foi retirado da região fraturada após o ensaio de flexão estática.

Tabela 5 – Divisão dos corpos-de-prova por ensaio

CP	Ensaio
1	Reposição
2	Inchamento
3	Condutividade térmica
4	Porosimetria
5	Tração perpendicular
6	Arrancamento de parafuso – topo
7	Tração perpendicular
8	Arrancamento de parafuso – face
9	Umidade
10	Reposição

Fonte: Autoria própria

Reservaram-se 2 corpos-de-prova para reposição como medida preventiva, o que se mostrou útil ao longo do trabalho de pesquisa. Além disso, considerou-se o uso de 2 CPs para o ensaio de tração perpendicular, visando o refinamento da análise estatística.

Os ensaios foram conduzidos conforme as diretrizes apontadas pelo documento normativo ABNT 14.810-2:2013, utilizando-se os procedimentos nele indicados, bem como as equações ali contidas para calcular os resultados.

As Figuras 10, 11, 12 e 13 mostram a execução dos ensaios.

Figura 10 – Máquina EMIC e ensaio de flexão estática

Fonte: Autoria própria

Figura 11 – Ensaio de tração perpendicular

Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Ensaio de inchamento em espessura 2 horas e 24 horas

Fonte: Autoria própria

Figura 13 – Ensaio de arrancamento de parafuso (topo e face)

Fonte: Autoria própria

4.6 Colorimetria

A colorimetria foi feita com o espectrofotômetro Konika Minolta Chroma Meter CR-410 juntamente com o processador de dados DP-400 da mesma fabricante conforme mostrado na Figura 14. Mediram-se os níveis de luminosidade (L^*), coordenada no eixo vermelho-verde (a^*) e a coordenada no eixo amarelo-azul (b^*) em cada um dos corpos-de-prova produzidos, calculou-se os valores de saturação (C^*) e ângulo de tinta (h^*), e fez-se a comparação dos resultados com as propriedades físicas e mecânicas obtidas através dos outros ensaios com o objetivo de buscar relações entre elas.

Figura 14 – Colorímetro e ensaio de colorimetria

Fonte: Autoria própria

A CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ou Comissão Internacional de Iluminantes, estabeleceu um sistema para definir a sensação da cor com base nos elementos de luminosidade ou claridade, tonalidade ou matiz, saturação ou cromaticidade e o ângulo de tinta.

A luminosidade, representada pela letra L^* , é medida em uma escala de tonalidades de cinza entre o preto e o branco que assume valores entre 0 (preto absoluto) e 100 (branco total). Ela é representada graficamente por uma linha reta que passa perpendicularmente pelo centro de um círculo.

A tonalidade é dada com base nas cores primárias, e é representada por duas retas perpendiculares entre si e dispostas no plano de um círculo, se cruzando no centro. A reta horizontal representa o eixo vermelho-verde e recebe a nomenclatura a^* , podendo assumir valores que variam de -60 ($-a^*$) até 60 ($+a^*$), onde valores positivos indicam deslocamento no sentido da cor vermelha, e valores negativos no sentido da cor verde. A reta vertical representa o eixo amarelo-azul e recebe a nomenclatura b^* , podendo assumir valores que variam de -60 ($-b^*$) até 60 ($+b^*$), onde valores positivos indicam deslocamento no sentido da cor amarela, e valores negativos no sentido da cor azul.

A saturação ou cromaticidade é dada pela variável C^* , que representa o afastamento a partir do eixo L^* , ou seja, quanto mais distante do eixo, maior é a saturação. Essa medida tem valor que pode variar entre 0 e 60 e é calculada em função de a^* e b^* conforme a Equação 4 abaixo:

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (4)$$

O ângulo de tinta (h^*) é um termo utilizado para a classificação geral da cor dentro da região do espectro visível (380 a 700 nm) onde há maior reflexão da luz; também é dado em função de a^* e b^* , e pode ser calculado com a Equação 5:

$$h^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (5)$$

A Figura 15 a seguir é uma representação do sistema de eixos da CIEL*a*b*.

Figura 15 – Eixos do sistema CIEL*a*b* e CIEL*C*H*

Fonte: Photonics.com

Segundo a fabricante Konika Minolta (2018), há dois métodos para fazer a medição da diferença de cores entre a amostra e o padrão escolhido; ela pode ser feita com base nas coordenadas CIEL*a*b* ou nas coordenadas CIEL*C*H*, sendo que na primeira são utilizadas coordenadas retangulares, e na segunda, coordenadas cilíndricas. A diferença (Δ) pode ser calculada através das seguintes equações:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (5)$$

Onde:

- ΔL^* - diferença de luminosidade (valor da amostra menos o padrão)
- Δa^* - diferença de vermelho-verde (valor da amostra menos o padrão)
- Δb^* - diferença de amarelo-azul (valor da amostra menos o padrão)
- ΔE^* - diferença total de cor

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^*)^2} \quad (6)$$

Onde:

- ΔC^* - diferença de cromaticidade (valor da amostra menos o padrão)
- ΔH^* - diferença de ângulo de tinta (valor da amostra menos o padrão)

Os valores obtidos para L^* , a^* e b^* de uma amostra indicam a diferença pontual em luminosidade, vermelho-verde e amarelo-azul que ela tem do padrão estabelecido, e o valor de ΔE^* vai determinar a diferença total de cor entre as duas. Esse ensaio se torna importante quando deseja-se manter a qualidade de cor, pois a análise visual pode não ser capaz de detectar variações mais sutis ou calcular a intensidade dessa variação.

4.7 Rugosimetria

Este ensaio foi aplicado para medir-se a rugosidade superficial do painel de partículas em termos do valor de R_a , que fornece uma indicação sobre as propriedades de adesão na superfície dos painéis, pois resultados que apresentam baixíssima rugosidade não proporcionam boa interação entre a cola e a superfície do painel.

A Figura 16 mostra o rugosímetro portátil da marca ROMATEX modelo TR100 que foi utilizado, e também o método de medição (método Stylus). O aparelho possui um sensor com uma ponta de contato de diamante que realiza um movimento linear uniforme na superfície de teste registrando os picos e vales; ele converte essa movimentação em sinais elétricos que são amplificados, filtrados e transformados em sinais digitais que são processados e exibidos na tela do próprio aparelho.

Figura 16 – Rugosímetro e ensaio de rugosidade

Fonte: Autoria própria

O ensaio foi realizado com o painel inteiro, no qual foram feitas 10 medições em pontos que cobriam regiões diferentes, para que fosse possível obter um valor médio para a peça toda.

4.8 Condutividade térmica

O ensaio foi realizado no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (CONSTRAMBI/ZEB) da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo (USP). Os procedimentos foram baseados no estudo de Cravo (2016) e nas recomendações contidas no documento normativo ASTM E 1530-11.

Os CPs foram cortados com 50 mm de diâmetro e 10 mm de espessura (Figura 17 b), e foi aplicada uma pasta térmica (em ambos os lados) com o objetivo de minimizar a resistência térmica entre amostra e equipamento (Figura 17a). Utilizou-se o equipamento DTC-300 modelo 2022 (Figuras 17c, 17d e 17e) para fazer a medição, e através da Equação 5 calculou-se a resistência térmica.

Figura 17 – Preparação e ensaio de condutividade térmica

Fonte: Autoria própria

A resistência térmica e a condutividade térmica foram calculadas com as equações 5 e 6 mostradas a seguir:

$$R_s = e/\lambda \quad (5)$$

Onde:

- R_s = resistência térmica da amostra [$\text{m}^2\text{K/W}$]
- e = espessura da amostra [m]
- λ = condutividade térmica [W/mK]

$$R_s = [(T_u - T_m)/Q] - R_{int} \quad (6)$$

Onde:

- R_s = resistência térmica da amostra [$\text{m}^2\text{K/W}$]
- T_u = temperatura da placa superior [$^{\circ}\text{C}$]
- T_m = temperatura da placa inferior [$^{\circ}\text{C}$]
- Q = fluxo de calor [W]
- R_{int} = resistência total da interface amostra/superfície das placas [$\text{m}^2\text{K/W}$]

4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As fotomicrografias de MEV foram obtidas na Central de Análises Químicas Instrumentais do Instituto de Química de São Carlos (CAQI/IQSC/USP) em um equipamento ZEISS LEO 440 (Cambridge, England) com detector OXFORD (model 7060), operando com feixe de elétrons de 20 kV, corrente de 2,82 A e I probe de 200 pA (Figura 18). As amostras foram retiradas da parte fraturada dos corpos-de-prova após o ensaio de flexão estática, para que pudesse ser verificada a qualidade da interação entre resina e partículas; essas amostras foram recobertas com uma camada de 6 nm de prata em um metalizador Coating System

BAL-TEC MED 020 (BAL-TEC Liechtenstein) e mantidas secas em estufa até o momento do ensaio.

Figura 18 – Ensaio MEV

Fonte: Autoria própria

4.10 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria foi feito no Instituto de Física de São Carlos (IFSC) da Universidade de São Paulo (USP), com o equipamento Micrometrics Poresizer modelo 9320, que tem capacidade de pressão de 200 MPa (Figura 19). Os principais parâmetros utilizados foram: densidade do mercúrio de 13,53 g/ml; ângulo de contato de 130°; CPs com 15 x 23 x 10 mm; tensão superficial do mercúrio de 485 dyn/cm.

Figura 19 – Corpo-de-prova e detalhes do ensaio de porosimetria

Fonte: Autoria própria

4.11 Lista de equipamentos

A relação completa dos equipamentos utilizados durante a pesquisa se encontra abaixo na Tabela 6.

Tabela 6 – Lista de equipamentos

Equipamento	Finalidade
Plaina desengrossadeira INVICTA com faca de 40 cm	Aplanar as peças de madeira para gerar as partículas
Batedeira LIEME BP-12 SL	Misturar resina e partículas
Batedeira G.PANIZ BP 38C	Misturar resina e partículas
Prensa MARCONI MA 098/50	Prensar o colchão
Máquina universal de ensaio AMSLER com capacidade de 250 kN	Ensaio de tração perpendicular e arrancamento de parafuso
Máquina universal de ensaio EMIC com capacidade de 30 kN	Ensaio de flexão estática
Equipamento ZEISS LEO 440 com detector OXFORD operando com feixe de elétrons de 20 kV	Ensaio de microscopia eletrônica de varredura
Máquina Micrometrics Poresizer 9320 com capacidade de pressão de 200 MPa	Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio
Máquina TA Instruments DTC-300 com faixa de medição de 0,1 a 40 W/m.K	Ensaio de condutividade térmica
Konika Minolta Chroma Meter CR-410	Ensaio de colorimetria
Rugosímetro ROMATEX TR100	Ensaio de rugosidade superficial

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para pleno entendimento das discussões e análises, os gráficos apresentados a seguir podem ser melhor visualizados e compreendidos mediante o entendimento da Figura 20, que mostra a separação visual entre os tratamentos abordados pela pesquisa.

Figura 20 – Mapa de interpretação dos gráficos de resultados

Fonte: Autoria própria

Os tratamentos ímpares correspondem às amostras de média densidade; os tratamentos pares correspondem às amostras de alta densidade; o primeiro grupo de tratamentos (T1 a T6) é referente às amostras feitas com maravalha de *Pinus*, e segundo grupo de tratamentos (T7 a T12) corresponde às amostras feitas com maravalha de *Eucalyptus*. As resinas estão ordenadas conforme mostrado na Figura 20 acima, ou seja, em pares de tratamentos, sendo que os elementos constituintes de cada par diferem apenas em densidade (T1 e T2 são ambos de maravalha de *Pinus* e ambos feitos com resina PUI, o que muda é somente a densidade de cada tratamento).

5.1 Ensaaios da norma

Os resultados dos ensaios estão mostrados na Tabela 7 e Tabela 8 abaixo:

Tabela 7 – Resultados dos ensaios da norma ABNT 14.810-2:2013

	ρ (g/cm ³)		IE 2h (%)		IE 24h (%)		APf (N)		APt (N)	
	X _m	CV(%)	X _m	CV(%)	X _m	CV(%)	X _m	CV(%)	X _m	CV(%)
T1	0,74	1,42	5,45	30,19	11,42	15,29	849	27,47	1469	35,65
T2	0,83	2,10	7,95	88,09	13,93	42,60	1362	12,94	1656	35,39
T3	0,67	2,84	8,38	24,98	9,78	24,25	979	17,89	1444	30,97
T4	0,75	5,22	6,97	26,97	9,28	9,55	1436	17,60	2105	19,84
T5	0,75	2,61	4,84	26,62	9,75	4,44	669	50,41	848	10,10
T6	0,79	3,60	10,87	44,45	19,28	36,99	742	23,37	587	34,16
T7	0,72	3,60	1,72	93,16	5,92	28,55	1118	25,15	1469	44,57
T8	0,77	3,51	1,83	68,53	5,50	43,91	1599	13,64	2382	33,07
T9	0,73	3,16	3,77	46,28	7,85	20,94	1028	12,78	1526	20,64
T10	0,78	3,56	2,92	52,51	6,37	16,43	1509	26,78	2448	16,44
T11	0,70	2,61	7,85	97,57	16,12	74,19	726	72,40	791	20,85
T12	0,77	2,14	2,68	105,02	7,15	51,92	742	37,63	1052	12,04

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Resultados dos ensaios da norma ABNT 14.810-2:2013

	MOE (MPa)		MOR (MPa)		TP (MPa)	
	X _m	CV(%)	X _m	CV(%)	X _m	CV(%)
T1	1462	5,98	17,00	7,44	2,18	10,46
T2	1943	3,93	22,17	5,27	1,78	48,63
T3	1369	9,08	16,67	9,80	1,73	33,10
T4	1800	6,57	21,83	10,61	1,51	47,65
T5	1665	14,43	15,83	19,74	1,08	17,83
T6	1529	11,22	14,83	6,63	0,72	43,91
T7	1796	13,62	20,00	17,03	1,61	51,98
T8	2136	8,67	24,17	11,23	2,38	54,80
T9	1880	8,03	18,50	10,11	1,71	24,02
T10	2165	6,09	24,17	6,09	1,93	45,73
T11	1639	16,31	13,17	13,08	1,25	49,74
T12	2185	10,40	17,33	6,99	1,32	43,22

Fonte: Autoria própria

A seguir, nas Tabelas 9, 10 e 11, estão apresentadas as classificações e os requisitos presentes nas principais normas que tratam de painéis de partículas.

Tabela 9 – Requisitos da norma ABNT 14.810-2:2013

	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	IE 24h (%)
P2	1800	11	0,4	18
P3	2050	15	0,45	17
P4	2300	16	0,4	19
P5	2550	18	0,45	13
P6	3150	20	0,6	16
P7	3350	22	0,75	10

Nota: dados para espessura entre 6 e 13 mm

Fonte: Autoria própria baseado no documento ABNT 14.810-2:2013

Tabela 10 – Requisitos da norma ANSI 208.1:1999

	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	APt (N)	APf (N)
H-1	2400	16,5	0,9	1800	1325
H-2	2400	20,5	0,9	1900	1500
H-3	2750	23,5	1	2000	1550
M-1	1725	11	0,4	NS	NS
M-S	1900	12,5	0,4	900	800
M-2	2250	14,5	0,45	1000	900
M-3	2750	16,5	0,55	1100	1000
LD-1	550	3	0,1	400	NS
LD-2	1025	5	0,15	550	NS

Fonte: Autoria própria baseado no documento ANSI 2018.1:1999

Tabela 11 – Requisitos da norma EN 312:2013

	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)	IE 24h (%)
P1	NS	12,5	0,28	NS
P2	1800	13	0,4	NS
P3	2050	15	0,45	14
P4	2300	16	0,4	16
P5	2550	18	0,45	11
P6	3150	20	0,6	15
P7	3350	22	0,75	9

Nota: dados para espessura entre 6 e 13 mm

Fonte: Autoria própria baseado no documento EN 312:2013

Abaixo estão os gráficos que representam as principais características mecânicas obtidas nos ensaios, contrastadas com os requisitos da norma nacional.

Gráfico 1 – Valores de MOE obtidos nos ensaios

Fonte: Autoria própria

Observa-se no Gráfico 1 que as amostras, em geral, apresentaram um baixo desempenho no que diz respeito ao MOE, com valores abaixo do valor mínimo exigido pela norma para a classificação P2 (painéis não estruturais para uso interno em condições secas); nota-se também que as amostras dos painéis feitos com maravalha de *Eucalyptus* (T7, T8, T9, T10, T11 e T12) tiveram um desempenho ligeiramente melhor. Com isso, foi possível observar que os painéis produzidos com maravalha, independente da resina e densidade, não apresentaram um regime elástico muito expressivo.

Entre os painéis de média densidade feitos com maravalha de *Pinus*, o que apresentou melhor desempenho foi aquele produzido com resina UF; entre os painéis de alta densidade feitos com maravalha de *Pinus*, o que apresentou maior desempenho foi aquele produzido com resina PU Impervég; entre os painéis de média densidade feitos com maravalha de *Eucalyptus*, o que apresentou melhor desempenho foi aquele produzido com resina PU Kehl; entre os painéis de alta densidade feitos com maravalha de *Eucalyptus*, o que apresentou maior desempenho foi aquele produzido com resina UF.

Gráfico 2 – Valores de MOR obtidos nos ensaios

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 2 mostra os valores calculados do MOR, e nota-se que as todas as amostras apresentaram bom desempenho e ficaram acima do limite inferior da classe P2; além disso, algumas amostras tiveram desempenho suficientemente alto para atingir a classe P5 (painéis estruturais para uso em condições úmidas). As amostras com maior valor de MOR foram os tratamentos T8 e T10, ambos de alta densidade e produzidos com maravalha de *Eucalyptus* e resina PU; o menor valor de MOR veio da amostra do tratamento T11, cujos painéis foram produzidos em média densidade, com maravalha de *Eucalyptus* e resina UF.

As amostras de painéis produzidos com resina UF tiveram desempenho inferior no MOR, tanto para aqueles feitos com maravalha de *Pinus* quanto de *Eucalyptus*.

Gráfico 3 – Valores e TP obtidos nos ensaios

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 3 mostra o desempenho das amostras no ensaio de TP, no qual nota-se que todos os tratamentos apresentaram resultados bastante elevados; somente a amostra do tratamento T6 não pôde ser enquadrada na classe P7 (painéis estruturais em condições severas de carga), e as amostras dos tratamentos T1, T8 e T10 tiveram desempenho muito acima dos outros. Observa-se também que o coeficiente de variação dos resultados foi bastante alto.

As amostras dos painéis produzidos com resina UF, tanto aqueles feitos com maravalha de *Pinus* quanto de *Eucalyptus* apresentaram valores mais baixos no ensaio de TP quando comparados com aqueles produzidos com resina PU.

Analisando o conjunto todo de dados dos ensaios, temos que os tratamentos T2, T4, T8, T9, T10 e T12 podem receber a classificação P2 (painéis não estruturais para uso interno em condições secas) da norma ABNT 14.810:2013. Os tratamentos T8, T10 e T12 também se enquadram na classificação P3 (painéis não estruturais para uso em condições úmidas) da mesma norma. A Tabela 12 mostra a classificação dos painéis de acordo com os requisitos de normas nacionais e estrangeiras.

Tabela 12 – Classificação dos painéis de maravalha segundo os requisitos de normas

Norma	Classe	Painéis
ABNT 14.810-2:2013	P2	T2, T4, T8, T9, T10, T12
ABNT 14.810-2:2013	P3	T8, T10, T12
ANSI 208.1:1999	M-1	T2, T4, T7, T8, T9, T10, T12
ANSI 208.1:1999	M-S	T2, T8, T10
EN 312:2013	P1	Todos
EN 312:2013	P2	T2, T4, T8, T9, T10, T12
EN 312:2013	P3	T8, T10, T12

Fonte: Autoria própria

Os resultados dos ensaios de MOR e TP mostram um melhor desempenho dos painéis produzidos com a resina poliuretana quando comparados aos painéis feitos com ureia-formaldeído, tanto para média como para alta densidade.

A densidade média dos painéis está representada no Gráfico 4, comparada com a faixa limitante sugerida pela norma ABNT 14.810:2013.

Gráfico 4 – Densidade média obtida no ensaio

Fonte: Autoria própria

A faixa em laranja representa o valor mínimo ($0,551 \text{ g/cm}^3$) e o valor máximo ($0,750 \text{ g/cm}^3$) de densidade indicado pela norma para que o painel seja considerado de média densidade. Os tratamentos com índice par representam os painéis que foram produzidos para serem classificados como de alta densidade, e os tratamentos com índice ímpar, representam os painéis que foram produzidos para serem classificados como de média densidade de acordo com o planejamento inicial proposto na Tabela 2.

Notou-se que no caso dos tratamentos T4 e T5, a média das densidades dos corpos-de-prova utilizados (X_m) foi de $0,750 \text{ g/cm}^3$, ou seja, eles ficaram exatamente no limite de transição.

Os resultados obtidos no ensaio de inchamento em espessura (IE) estão representados no Gráfico 5 abaixo:

Gráfico 5 – Resultados do ensaio de inchamento em espessura de 24 horas

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar pelo gráfico, que o desempenho dos painéis em ambiente úmido foi muito bom, estando a maioria dos tratamentos situados na região abaixo do limite estabelecido pela norma para a classificação P7. Nota-se também que as amostras dos painéis produzidos com maravalha de *Eucalyptus* tiveram melhor desempenho dos que as amostras dos painéis produzidos com maravalha de *Pinus*.

Somente a amostra do tratamento T6 (alta densidade, resina UF e maravalha de *Pinus*) não atingiu o requisito mínimo exigido pela classe P2.

Os dados obtidos nos ensaios de arrancamento de parafuso de topo e face estão apresentados nos gráficos a seguir:

Gráfico 6 – Arrancamento de parafuso de face

Fonte: Autoria própria

Gráfico 7 – Arrancamento de parafuso de topo

Fonte: Autoria própria

Em ambos os resultados dos ensaios de arrancamento de parafuso, ficou evidente o melhor desempenho dos corpos-de-prova produzidos com resina PU, tanto para média quanto para alta densidade. No geral, as amostras de alta densidade apresentaram valores maiores em ambos os ensaios, exceto pelo tratamento T6, que no ensaio de APt teve desempenho menor do que tratamento de média densidade.

5.2 Propriedades térmicas

A Tabela 13 e o Gráfico 8 abaixo mostram os dados de condutividade e resistência térmica obtidos através do ensaio.

Tabela 13 – Dados do ensaio de condutividade térmica

	λ (W/mK)		R_s (m ² K/W)	
	X_m	CV (%)	X_m	CV (%)
T1	0,17	5,32	0,058	4,04
T2	0,18	3,62	0,056	6,59
T3	0,16	5,72	0,062	5,75
T4	0,19	2,01	0,056	15,32
T5	0,15	2,61	0,062	4,71
T6	0,17	1,40	0,059	3,28
T7	0,15	6,38	0,062	5,86
T8	0,16	2,96	0,064	4,71
T9	0,14	2,79	0,072	4,06
T10	0,16	3,29	0,063	5,96
T11	0,14	4,16	0,064	9,78
T12	0,15	6,93	0,066	5,92

Fonte: Autoria própria

Gráfico 8 – Dados da análise térmica

Fonte: Autoria própria

Observa-se que os valores de condutividade térmica ficaram próximos de 0,15 W/mK, apresentando pouca dispersão nos resultados (coeficiente de variação máximo de 6,93%), e também que as amostras retiradas dos painéis produzidos com resina PU (T1, T2, T3, T4, T7, T8, T9 e T10) apresentaram valores mais elevados do que as amostras retiradas dos painéis produzidos com resina UF (T5, T6, T11 e T12). Os valores de resistência térmica também apresentaram baixa dispersão e ficaram próximos à 0,06 m²K/W.

Os painéis de alta densidade (T2, T4, T6, T8, T10 e T12) apresentaram valores maiores de condutividade térmica conforme fica evidenciado no Gráfico 8 acima. Maior condutividade significa melhor transmissão de energia térmica, ou seja, o material é considerado melhor transmissor e pior isolante; no caso da aplicação de painéis de partículas como parte de construções do tipo wood-frame, é interessante que os painéis apresentem valores de condutividade menores, para que possam ser usados com a função de isolamento térmico. É interessante observar então que, com menos matéria-prima (no caso, os painéis de média densidade), foi possível produzir painéis com qualidade de isolamento melhores.

As amostras feitas com maravalha de *Eucalyptus* demonstraram melhores qualidades de isolamento em comparação com os painéis feitos com maravalha de *Pinus*, o que condiz com os resultados do ensaio de porosimetria, que apontaram maior porosidade nessas amostras, e a baixa condutividade do ar acaba influenciando na condutividade final do painel.

A norma ABNT 15220:2003 cita, de forma indicativa (não restritiva), um valor de condutividade térmica referente aos painéis de madeira aglomerada de média densidade que está mostrado no Gráfico 8 acima em comparação com os resultados obtidos no ensaio.

Observa-se que apenas duas amostras (T2 e T4) não tiveram desempenho satisfatório conforme recomendado pelo documento normativo supracitado, as outras amostras puderam ser classificadas como adequadas ao bom isolamento térmico; deve-se considerar também, que as paredes feitas em madeira são um sistema com diversas camadas, incluindo uma camada de ar e outros materiais, e assim, o real conforto térmico obtido em uma construção seria diferente do valor medido diretamente no ensaio da amostra de um painel.

5.3 Ensaio de rugosidade superficial

O ensaio de rugosidade superficial gerou os resultados apresentados na Tabela 14 e no Gráfico 9 a seguir.

Tabela 14 – Dados da análise de rugosidade superficial

Ra (μm)		
Tratamento	X_m	CV (%)
T1	1,79	32,77
T2	2,02	18,82
T3	1,47	24,41
T4	1,51	29,27
T5	1,53	53,38
T6	1,63	21,61
T7	1,84	14,29
T8	2,21	19,00
T9	1,80	25,67
T10	2,16	6,31
T11	1,86	15,91
T12	2,31	14,29

Fonte: Autoria própria

Gráfico 9 – Rugosidade superficial

Fonte: Autoria própria

Observa-se que as amostras de alta densidade apresentaram valores superiores de rugosidade quando comparadas com as amostras de média densidade para uma mesma

configuração de resina e espécie da partícula, e as amostras dos painéis feitos com maravalha de *Eucalyptus* apresentaram maior rugosidade do que aquelas feitas com madeira de *Pinus*.

A norma NBR 8404:1984 apresenta um padrão de classificação de rugosidade, e a Tabela 15 a seguir mostra a comparação dos resultados obtidos no ensaio com as classes de rugosidade apresentadas pela norma.

Tabela 15 – Classes de rugosidade das amostras

Tratamento	Classe
T1	N8
T2	N8
T3	N7
T4	N7
T5	N7
T6	N8
T7	N8
T8	N8
T9	N8
T10	N8
T11	N8
T12	N8

Fonte: Autoria própria

Os painéis T3, T4 e T5 que foram enquadrados na classe N7, ficaram bem próximos do limite de transição para a classificação N8, que é $1,6 \mu\text{m}$.

A literatura sobre análise de rugosidade em painéis de partículas de madeira mostra que os resultados obtidos aqui foram compatíveis com os de Nascimento (2018), cujas medidas de rugosidade (R_a) variaram entre $0,07 \mu\text{m}$ e $2,82 \mu\text{m}$ em painéis de partículas feitos

com resina poliuretana; a pesquisa de Ulker (2018) encontrou valores de Ra entre 6,95 μm e 10,99 μm em painéis feitos com madeira da espécie *Juniperus virginiana* e resina UF; já o estudo de Saad (2017) chegou a valores de 2,4 μm com uso de resina Fenol-formaldeído e 3,0 μm com resina Metileno difenil diisocianato.

É interessante observar que na pesquisa de Hiziroglu (2014), os valores de rugosidade superficial (Ra) mais elevados proporcionaram maior força de aderência, ou seja, dependendo da aplicação final dos painéis, talvez seja interessante que a superfície não seja muito lisa. Caso haja a necessidade de aplicação de lâmina de madeira sobre o painel, valores mais elevados de rugosidade superficial poderão contribuir com a qualidade da interação com a cola; já em caso de aplicação como piso, é preferível que se tenha uma superfície com baixos valores de Ra.

5.4 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 21 apresenta a visão geral das amostras submetidas ao ensaio de MEV, com aproximação de 200X.

Figura 21 – Imagens de MEV com aproximação de 200X

IQSC EHT=20.00 kV WD= 37 mm Mag= 200 X Detector= SE1
30µm H Photo No.=483 21-Feb-2018

IQSC EHT=20.00 kV WD= 37 mm Mag= 200 X Detector= SE1
30µm H Photo No.=488 21-Feb-2018

IQSC EHT=20.00 kV WD= 34 mm Mag= 200 X Detector= SE1
30µm H Photo No.=494 21-Feb-2018

IQSC EHT=20.00 kV WD= 38 mm Mag= 200 X Detector= SE1
30µm H Photo No.=498 21-Feb-2018

Fonte: Autoria própria

Na imagem referente ao tratamento T1, nota-se que a fratura danificou algumas das regiões, deixando vários pontos onde não há resina. Porém é possível ver que ainda há locais com resina na forma de placas. É possível também observar os dutos que compõem a estrutura da madeira, bem como o modo como a resina está espalhada ao redor de alguns deles, indicando que houve escorrimento para seu interior.

Na imagem referente ao tratamento T3, nota-se um bom espalhamento da resina, que está presente na maior parte da amostra e formou placas em algumas regiões, deixando poucas áreas de vazios. O mesmo ocorre com o tratamento T5, em cuja imagem é possível notar que a resina formou uma superfície bem homogênea e sólida, porém, convém ressaltar que as imagens não necessariamente refletem os resultados obtidos nos ensaios, pois são analisadas regiões muito pequenas em comparação com as dimensões de cada painel.

Na imagem referente ao tratamento T7, observa-se que os vestígios de resina não estão tão presentes quanto nos tratamentos T3 e T5; nota-se também que se formou uma placa de resina na região central da amostra com aspecto bastante viscoso, pois não há deformação das placas indicando escorrimento para o interior dos poros da madeira.

No tratamento T9 há grandes regiões de vazio e uma porção de área coberta com resina em forma de placas. Esses espaços vazios podem representar os locais onde a interação entre partícula e resina falhou, ou seja, onde houve um deslocamento de material devido à ação da carga aplicada no corpo-de-prova durante o ensaio de flexão estática, já que as amostras foram retiradas da região de fratura.

Na imagem referente ao tratamento T11, nota-se uma baixa quantidade de resina, onde pode-se ver os poros da madeira em quase toda a superfície analisada.

5.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os Gráficos 10 a 12 mostram a distribuição dos dados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, mais especificamente o diâmetro dos poros pelo volume de intrusão diferencial que indica a distribuição dos poros na faixa de diâmetros encontrada no ensaio.

Gráfico 10 – Dados dos tratamentos T2 e T4

Fonte: Autoria própria

Gráfico 11 – Dados dos tratamentos T6 e T8

Fonte: Autoria própria

Gráfico 12 – Dados dos tratamentos T10 e T12

Fonte: Autoria própria

Observou-se que na amostra T2, a maioria dos poros se encontra na faixa de diâmetros entre 0 μm e 6,30 μm ; na amostra T4 a maioria dos poros se encontra na faixa de diâmetros entre 0 μm e 7,50 μm ; na amostra T6 a maioria dos poros se encontra na faixa de diâmetros entre 0 μm e 6,00 μm ; na amostra T8 a maioria dos poros se encontra na faixa de diâmetros entre 0 μm e 5,00 μm ; na amostra T10 a maioria dos poros se encontra na faixa de diâmetros entre 0 μm e 5,50 μm ; na amostra T12 a maioria dos poros se encontra na faixa de diâmetros entre 0 μm e 3,50 μm . Isso indica que o diâmetro médio dos poros se manteve bem similar em todas as amostras.

A Tabela 16 a seguir mostra as características obtidas no ensaio de porosimetria, e o Gráfico 13 mostra a porosidade medida pelo equipamento.

Tabela 16 – Características porosimétricas das amostras

Característica	T2	T4	T6	T8	T10	T12
Volume total de intrusão (mL/g)	0,28	0,62	0,53	0,58	0,54	0,55
Área total de poros (m ² /g)	24,86	2,24	5,28	43,24	40,04	29,76
Diâmetro médio dos poros (μm)	0,19	13,54	8,36	0,16	0,21	0,59
Densidade (g/mL)	1,10	0,65	0,76	0,81	0,84	0,83
Densidade aparente (g/mL)	1,60	1,09	1,26	1,54	1,54	1,54
Porosidade (%)	31,02	40,34	40,01	47,40	45,54	45,96

Fonte: Autoria própria

Gráfico 13 – Porosidade das amostras

Fonte: Autoria própria

Observa-se que as amostras dos painéis feitos com maravalha de *Eucalyptus* apresentaram maior porcentagem de poros. Pela Tabela 16, nota-se que a amostra T2, que teve a menor porcentagem de poros, foi também a que apresentou menor volume total de intrusão, e uma baixa área total de poros; já nas amostras T4 e T6 observou-se um comportamento peculiar em relação à área total de poros, pois elas apresentaram valores muito abaixo das outras amostras, diferente do que se esperava ao analisar a porcentagem de poros e o volume total de intrusão de cada uma delas.

Algumas pesquisas anteriores que avaliaram a porosidade de painéis de partículas de madeira encontraram valores como: Bertolini (2011) produziu painéis com partículas de *Pinus* tratado com CCB e resina PU, e obteve porosidade média de 29%; Varanda (2012) produziu painéis com partículas de *Eucalyptus grandis* e resina PU, e obteve porosidade média de 38,64%; Bertolini (2014) produziu painéis com partículas de *Pinus* tratado com CCB e resina PU, e obteve porosidade média de 53,64%. Os resultados obtidos nesse ensaio foram de coerentes com aqueles encontrados na literatura.

5.6 Colorimetria

O ensaio de colorimetria gerou os dados apresentados na Tabela 17 e na Tabela 18, onde L^* representa o índice de luminosidade; a^* representa a coordenada no eixo vermelho-verde, sendo que valores positivos indicam um deslocamento em direção ao vermelho, e valores negativos em direção a cor verde; b^* representa a coordenada no eixo azul-amarelo, onde valores positivos indicam deslocamento no eixo em direção ao amarelo, e valores negativos em direção ao azul; C^* representa o valor de cromaticidade ou saturação, que é tido como um afastamento do eixo L^* , sendo que quanto mais afastado, maior é a saturação da cor; h^* representa o ângulo de tinta, que é o termo usado na classificação geral da cor dentro da região do espectro visível (380 a 700 nm) onde há maior reflexão da luz.

Tabela 17 – Dados do ensaio de colorimetria

	L*		a*		b*	
	X _m	CV (%)	X _m	CV (%)	X _m	CV (%)
T1	77,77	0,59	6,55	3,62	30,29	3,80
T2	77,51	0,74	6,65	1,55	29,98	1,39
T3	79,58	2,72	5,74	5,24	29,29	2,51
T4	78,64	0,94	5,99	3,54	29,73	1,29
T5	81,57	0,47	5,10	8,85	29,62	1,30
T6	82,41	1,80	4,92	7,47	27,37	3,26
T7	65,38	1,39	15,13	0,79	23,64	1,50
T8	64,83	0,95	15,19	1,07	23,27	2,06
T9	65,20	0,50	14,67	2,14	23,37	1,33
T10	64,26	0,59	15,06	1,05	23,62	1,96
T11	67,87	0,48	14,51	2,25	23,41	2,34
T12	67,45	0,84	14,35	2,47	22,70	0,89

Fonte: Autoria própria

A Tabela 18 mostra os valores calculados de Cromaticidade (C*) e Ângulo de tinta (h*) de cada tratamento.

Tabela 18 – Cromaticidade e Ângulo de tinta

	C*		h*	
	X _m	CV (%)	X _m	CV (%)
T1	31,15	9,52	77,80	1,25
T2	30,71	3,73	77,49	1,26
T3	29,85	2,97	78,90	1,79
T4	30,34	4,66	78,58	1,51
T5	30,06	1,91	80,24	1,34
T6	27,81	4,12	79,83	1,05
T7	28,06	2,33	57,39	1,25
T8	27,79	2,42	56,86	1,26
T9	27,59	2,95	57,88	1,01
T10	28,01	2,23	57,47	1,32
T11	27,55	3,77	58,20	1,78
T12	26,86	2,03	57,72	2,27

Fonte: Autoria própria

Abaixo estão os gráficos das propriedades mostradas na Tabela 17 e Tabela 18, juntamente com os coeficientes de variação dos valores.

Gráfico 14 – Variação de L* de acordo com o tratamento

Fonte: Autoria própria

Gráfico 15 – Variação de a* de acordo com o tratamento

Fonte: Autoria própria

Gráfico 16 – Variação de b^* de acordo com o tratamento

Fonte: Autoria própria

Gráfico 17 – Variação de cromaticidade de acordo com o tratamento

Fonte: Autoria própria

Gráfico 19 – Variação do ângulo de tinta de acordo com o tratamento

Fonte: Autoria própria

Observa-se, no Gráfico 15, que mostra a variação das cores no eixo vermelho-verde, que os tratamentos T7, T8, T9, T10, T11 e T12 apresentam valores maiores, pois são justamente as amostras dos painéis produzidos com *Eucalyptus*, que naturalmente apresenta uma cor avermelhada. Já os painéis T1, T2, T3, T4, T5 e T6, apresentaram maiores valores de b^* , que representa o eixo amarelo-azul, o que condiz com a coloração natural da madeira de *Pinus*. Estes dados mostram o mesmo padrão de coloração obtido na pesquisa de Castro (2014), na qual os painéis feitos com madeira de *Pinus* também apresentaram maiores valores do índice b^* .

Nota-se que a resina UF deu origem a painéis com valor de luminosidade L^* ligeiramente maiores do que as resina à base de PU, visto que ela possui uma cor leitosa, enquanto as resinas PU tem tonalidade amarelada.

Em sua pesquisa, CAMARGOS (2001) propôs a elaboração de uma tabela de cores para classificar as madeiras, e de acordo com agrupamentos construídos com base nas características colorimétricas L^* , a^* , b^* , C^* e h^* . Nessa classificação ele considera as madeiras com $L^* > 56$ como de alta claridade, e sendo assim, todos os tratamentos aqui analisados apresentaram valores de L^* acima de 56, o que também foi comprovado na

pesquisa de GARCIA (2014) para a madeira da espécie *Eucalyptus grandis*. Quanto à classificação segundo a tabela de cores, os tratamentos foram divididos conforme Tabela 19:

Tabela 19 – Classificação das cores dos tratamentos

Tratamento	Cor
T1	Amarelo-claro / Branco-acinzentado
T2	Amarelo-claro / Branco-acinzentado
T3	Amarelo-claro / Branco-acinzentado
T4	Amarelo-claro / Branco-acinzentado
T5	Amarelo-claro / Branco-acinzentado
T6	Amarelo-claro / Branco-acinzentado
T7	Rosa / Amarelo-amarronzado
T8	Rosa / Amarelo-amarronzado
T9	Rosa / Amarelo-amarronzado
T10	Rosa / Amarelo-amarronzado
T11	Rosa / Amarelo-amarronzado
T12	Rosa / Amarelo-amarronzado

Fonte: Autoria própria

A comparação dos valores das propriedades colorimétricas com a tabela de cores desenvolvida por CAMARGOS (2001) sugeriu que as amostras de T1 até T6 se enquadravam como sendo parte dos grupos Amarelo-claro e Branco-acinzentado, já as amostras de T7 até T12 ficaram mais próximas dos grupos Rosa e Amarelo-amarronzado.

Os valores encontrados para os índices a^* e b^* nas amostras de painéis feitos com maravalha de *Pinus* ficaram próximos aos encontrados na pesquisa de Nascimento (2018).

6 CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados dos ensaios realizados nessa pesquisa, pôde-se concluir que os painéis de partículas produzidos com maravalha sem a homogeneização têm potencial técnico para serem utilizados em diversas aplicações, necessitando somente de alguns refinamentos no processo produtivo para realçar algumas propriedades e se enquadrar nas normas utilizadas como referência e nas exigências de cada aplicação. Tanto a maravalha proveniente da madeira de *Pinus* quanto a proveniente da madeira de *Eucalyptus* tiveram bom desempenho nas avaliações.

Ficou claro também o bom desempenho das resinas poliuretanas de baixo impacto ambiental, e mostrou-se que elas são excelentes substitutas para as resinas à base de formaldeído devido às qualidades físico-mecânicas que elas conferiram aos painéis, além do fato de não conterem formaldeído em sua formulação.

Os painéis demonstraram ter potencial para serem utilizados como parte de um sistema de isolamento térmico em construções do tipo wood-frame devido aos resultados obtidos no ensaio de condutividade térmica.

Além disso, a rugosidade obtida (sem lixamento) mostrou-se favorável a aplicações que exijam uma superfície onde será aplicado algum tipo de cola ou resina (no caso de uma laminação com madeira, por exemplo).

Uma sugestão para trabalhos futuros é explorar o potencial de isolamento térmico que os painéis apresentaram, variando a espessura, quantidade de resina e partículas para compreender melhor o comportamento do material e tentar atingir propriedades otimizadas para esta aplicação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **A208.1**: Particleboard. Gaithersburg. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1530-11**: standard test method for evaluating the resistance to thermal transmission of material by the guarded heat flow meter technique. West Conshohocken. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.810**: Painéis de partículas de média densidade. Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.810**: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro. 2003.

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

BERGLUND, L.; ROWEL, R. M. Wood composites. In: **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005, cap. 10.

BERTOLINI, M. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Thermal insulation particleboards made with wastes from wood and tire rubber. **Key Engineering Materials**, v. 688, p. 263-269, 2015.

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**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2014.

BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de *Pinus sp.* tratado com preservante CCB na produção e chapas de partículas homogêneas utilizando resina à base de mamona**. São Carlos: Universidade de São Paulo. 2011.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 3 de Agosto de 2010. Institui a politica nacional de resíduos sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998; e dá outras providências.

Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)

2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 12 jan. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, 2012.

BRITO, E. Estimativa da produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira. **Floresta e Ambiente**, Ano 2, 1995.

CABRAL, M. R. et al. Painéis de partículas com maravalha de *Pinus spp.* e fibra de sisal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 353-362, 2017.

CALISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. LTC, 2012.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n. 71, p. 30-41, 2001.

CASTRO, V. G. et al. Avaliação colorimétrica de aglomerados produzidos com partículas de madeira de *Sequoia sempervirens* e *Pinus taeda* submetidos ao intemperismo natural. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 475-483, 2014.

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

CONNER, A. H.; BHUIYAN, M. S. H. Wood: Ahesives. In: **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, Elsevier, 2017.

CRAVO, J. C. M. **Painéis de partículas de saco de cimento e embalagem longa vida aplicados forro em protótipos de aviários**. Pirassununga: Universidade de São Paulo, 2016.

DOS SANTOS, M. F. N. et al. Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum ssp.*) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*). **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 345-355, 2014.

ECHA. Formaldehyde and Formaldehyde Releasers. **European Chemicals Agency**, Helsinki, 2017. Disponível em:

<https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/annex_xv_report_formaldehyde_en.pdf/58be2f0a-7ca7-264d-a594-da5051a1c74b>. Acesso em: 20 jan. 2018.

EUROPEAN STANDARD. **CSN EN 312**: Particleboards – Specifications. Brussels. 2003.

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduo do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

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, p. 175-182, 2015.

FIORELLI, J. et al. Particleboards with waste wood from reforestation. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 36, n. 2, p. 251-256, 2014.

FREE, M. **The difference between Ra and Rz**. Production Machining. Disponível em: <<https://www.productionmachining.com/blog/post/the-difference-between-ra-and-rz>>. Acesso em 25 mar. 2018.

GAMAGE, N. et al. Properties of hardwood saw mill residue-based particleboards as affected by processing parameters. **Industrial crops and products**, v. 29, p. 248-254, 2009.

GARCIA, R. A. et al. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **CERNE**, v. 20, n. 4, p. 509-517, 2014.

GERWING, J; et al. Rendimento no processamento de madeira no estado do Pará. **Imazon, Série Amazônia**, Belém, n. 18. 2001.

GOBLE, D.; PECK, M. Opportunities for using sawmill residues in Australia. **Forest and Wood Products Australia**, Melbourne, 2013. Disponível em: <<https://www.fwpa.com.au/images/processing/PRB280-1112-Opportunities-for-using-Sawmill-Residues-in-Australia-2013.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

HAZRATI-BEHNAGH, M. et al. Mechanical and insulation performances of ultralight thick particleboard from sugarcane residues and wood planer shavings. **European Journal of**

Wood and Wood Products, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, v. 74, p. 161-168, 2016.

HIZIROGLU, S.; ZHONG, Z. W.; ONG, W. K. Evaluating of bonding strength of pine, oak and nyatoh wood species related to their surface roughness. **Measurement**, Elsevier v. 49, p. 397-400, 2014.

HIZIROGLU, S. Surface roughness evaluation of medium density fiberboard (MDF) using stylus and pneumatic methods. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlim: Springer-Verlag Heidelberg, v. 63, p. 81-82, 2005.

IBÁ. Relatório 2017. **Indústria Brasileira de Árvores**, Brasília, 2017. Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2018.

INGERSON, A. Wood products and carbon storage: can increased production help solve the climate crisis ? **The wilderness society**, Washington D.C., 2009.

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

IWAKIRI, S. Painéis de madeira aglomerada. **Notas de aula**, Universidade Federal do Paraná, p. 20, 2000. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinassetsuo/setsuo-pma.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. 703p.

KONIKA MINOLTA. **Identifying color differences using L*a*b* or L*C*H* coordinates**. Disponível em: <<https://sensing.konicaminolta.us/blog/identifying-color-differences-using-l-a-b-or-l-c-h-coordinates/>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry process fiberboard manufacturing**. Backbeat Books, 1977. 672p.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. Illinois: Southern Illinois University Press, 1974. 244p.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPR, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 2010. 176p.

- NASCIMENTO, M. F. et al. Painéis de partículas homogêneas fabricados com resíduos lignocelulósicos e resina alternativa para aplicação em pisos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44 p. 1-6, 2016.
- NASCIMENTO, M. F. et al. Efeitos das intempéries na rugosidade de painéis de partículas de *Pinus sp.* **Ambiente Construído**, v. 18, p. 227-238, 2018.
- OLMOS, M. A. C. **Equipamentos e processo de fabricação de chapas de madeira aglomeradas a partir de resíduos de madeira**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1992.
- ORMONDROYD, G. A. Adhesives for wood composites. In: ANSEL, M. P. **Wood Composites**, Elsevier, p. 47-66, 2015.
- RIVELA, B. et al. Life cycle inventory of particleboard: a case study in the wood sector. **The international journal of life cycle assesment**, Berlin, v. 11, n. 2, p. 106-113, 2006.
- SAAD, S. et al. Effect of accelerated aging treatment on a surface property and dynamic mechanical properties of commercial wood-based panels. **Journal of Wood Science**, v. 63, n. 5, p. 496-505, 2017.
- SAM-BREW, S.; SMITH, G. D. Flax shive and hemp hurd residues as alternative raw material for particleboard production. **Bioresources**, Raleigh, v. 12, n. 3, p. 5715-5735, 2017.
- SATOSHI, S.; HIZIROGLU, S. Evaluation of shear strength of japanesewood species as a function of surface roughness. **Forest Products Journal**, v. 60, n. 4, p. 400-404, 2010.
- ULKER, O. Surface roughness of composite panels as a quality control tool. **Materials**, v. 11, n. 3, p. 407, 2018.
- VARANDA, L. D. et al. Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio em painéis de partículas. **Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 13, p. 81-90, 2012.
- VARANDA, L. D. et al. Desempenho físico de painéis de partículas usando adesivo à base de óleo de mamona. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 22, n. 10, p. 707-712, 2018.
- VIDAL, E. et al. Redução de desperdícios na produção de madeira na Amazônia. **Imazon, Série Amazônia**, Belém, n. 5. 1997.

WIECHETECK, M. Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos.

Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2009. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf>.

Acesso em: 20 fev. 2018.

WILSON, J. B. Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. **Wood and fiber science**, Monona, v. 42, p. 90-106, 2010.