

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS**

WANLEY EDUARDO LOPES JUNIOR

**Piso engenheirado de biomassa florestal residual com micropartículas
incorporadas**

Pirassununga – SP

2023

WANLEY EDUARDO LOPES JUNIOR

**Piso engenheirado de biomassa florestal residual com micropartículas
incorporadas**

Versão Corrigida

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo para defesa do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:

Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria.

Orientador:

Prof^o. Dr. Juliano Fiorelli

Pirassununga – SP

2023

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L864p Lopes Junior, Wanley Eduardo
 Piso engenheirado de biomassa florestal residual
 com micropartículas incorporadas / Wanley Eduardo
 Lopes Junior ; orientador Juliano Fiorelli. --
 Pirassununga, 2023.
 101 f.

 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade de
 Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade
 de São Paulo.

 1. Madeira Balsa. 2. Resina orgânica. 3. Óxido de
 alumínio. 4. Óxido de zinco. 5. Pisos engenheirados.
 I. Fiorelli, Juliano, orient. II. Título.

“Dedico este trabalho a todos os alunos, professores e técnicos envolvidos com o Grupo de Construções e Ambiência – CONSTRAMBI, com os quais aprendi muito, e àqueles que possuem grande paixão pela área de materiais.”

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Juliano Fiorelli, que nos anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para o meu crescimento científico e intelectual.

À minha esposa Camila Ribas Sposito por me apoiar, acreditar em mim e sempre estar presente em todos os momentos.

À minha família, em especial à Wanley Eduardo Lopes e Rosangela Aparecida Vidal Lopes que sempre me aconselharam e incentivaram meus estudos.

Aos Técnicos Mariana Pavesi, Zaqueu Dias de Freitas e Diego Ferrari, que contribuíram para que os processos fossem realizados no laboratório.

Aos meus amigos, pela amizade e por toda a ajuda dada durante o período, e professores do Laboratório de Construções e Ambiência (CONSTRAMBI), por todo apoio dado e pelo carinho de todos.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação.

À FAPESP (proc. 2021/08432-3) e ao CNPq (proc.405201/2021-4 e proc. 309120/2020-9) por ter financiado em parte a pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código financeiro 001, pelo auxílio financeiro em parte da pesquisa e a concessão da bolsa.

Sou eternamente grato!

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá.

De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

LOPES JUNIOR, W. E. **Piso engenheirado de biomassa florestal residual com micropartículas incorporadas**. 2023. 101f. Defesa (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023.

O desenvolvimento de novos materiais para o setor da construção civil é uma tendência mundial, e produtos que utilizam subprodutos em sua composição e também, possuam tecnologia incorporada, mostram-se competitivos comercialmente. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de painéis de partículas orientadas (OSB) de madeira Balsa residual com incorporação de micropartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3) ou óxido de zinco (ZnO) aglomeradas com resina poliuretana à base de óleo de mamona (PU de mamona) para serem usadas na camada suporte do piso engenheirado e avaliar o desempenho físico e mecânico do piso projetado (EWF Balsa). Os painéis foram produzidos em escala laboratorial com média densidade (650 kg/m^3), partículas do tipo strand, 13% de resina e teor de micropartículas variando em 1, 2 e 3%. As propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram comparadas com os requisitos do documento normativo EN-300:2002 para tipo 2 fins estruturais utilizados em ambiente seco. Os resultados mostraram que o uso de micropartículas de ZnO não resultaram em melhorias significativas para as propriedades mecânicas e físicas quando comparados com painéis sem a presença de micropartículas em sua formulação. No caso das micropartículas de Al_2O_3 , a composição com 2% apresentou resultados significativos para adesão interna e inchamento em 24 horas antes e após o intemperismo acelerado, evidenciando o efeito positivo da incorporação das micropartículas de Al_2O_3 nos painéis OSB de madeira residual de média densidade. Em seguida, foram produzidos os EWF Balsa e comparados com o desempenho físico e mecânico dos EWF comerciais. Os resultados obtidos indicaram que os EWF Balsa apresentaram propriedades mecânicas equivalentes aos EWF comerciais, provando o potencial dos painéis OSB de madeira Balsa aplicados nos EWF e que a incorporação de 2% micropartículas de Al_2O_3 na camada suporte pode ser uma solução eficiente para obter bons resultados nas propriedades físicas. Por fim, pode-se concluir que o produto resultante da pesquisa (EWF Balsa) pode ser utilizado na construção civil e áreas afins.

Palavras-chave: Madeira Balsa, Resina orgânica, Óxido de alumínio, Óxido de zinco, Pisos engenheirados.

ABSTRACT

LOPES JUNIOR, W. E. **Engineered floor of residual forest biomass with incorporated microparticles.** 2023. 101f. Defesa (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023.

The development of new materials for the construction sector is a worldwide trend, and products that use by-products in their composition and also have incorporated technology are commercially competitive. In this context, the present research aims to evaluate the potential of oriented particle boards (OSB) of residual Balsa wood with incorporation of microparticles of aluminum oxide (Al_2O_3) or zinc oxide (ZnO) agglomerated with polyurethane resin based on castor oil to be used in the support layer of the engineered floor and to evaluate the physical and mechanical performance of the designed floor (EWF Balsa). The panels were produced on a laboratory scale with medium density (650 kg/m^3), strand-type particles, 13% resin and microparticle content varying in 1, 2 and 3%. The physical and mechanical properties of the panels were compared with the requirements of the normative document EN-300:2002 for type 2 structural purposes used in a dry environment. The results showed that the use of ZnO microparticles did not result in significant improvements to the mechanical and physical properties when compared to panels without the presence of microparticles in their formulation. In the case of Al_2O_3 microparticles, the 2% composition showed significant results for internal adhesion and swelling in 24 hours before and after accelerated weathering, evidencing the positive effect of the incorporation of Al_2O_3 microparticles in OSB panels of medium density residual wood. Then, the EWF Balsa were produced and compared with the physical and mechanical performance of the commercial EWF. The results obtained indicated that the EWF Balsa presented mechanical properties equivalent to the commercial EWF, proving the potential of the OSB panels of Balsa wood applied in the EWF and that the incorporation of 2% microparticles of Al_2O_3 in the support layer can be an efficient solution to obtain good results in the physical properties. Finally, it can be concluded that the product resulting from the research (EWF Balsa) can be used in civil construction and related areas.

Keywords: Balsa wood, Organic resin, Aluminium oxide, Zinc oxide, Engineered floor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Artigos publicados com o termo “OSB panel” .	22
Figura 2: Artigos publicados com o termo “OSB panel;Balsa wood”	23
Figura 3: Artigos publicados com o termo “OSB panel; floor” .	24
Figura 4: Árvores de madeira Balsa (<i>Ochroma Pyramidale</i>).	25
Figura 5: Tipos de painéis de madeira reconstituída	28
Figura 6: Orientação das lascas na produção dos painéis.	30
Figura 7: Seção transversal do piso de madeira projetada modificado.	37
Figura 8: Fluxograma das rotas experimentais.	40
Figura 9: Fluxograma das caracterizações dos EWF Balsa.	42
Figura 10: Madeira Balsa residual	43
Figura 11: Lâmina de madeira Teca (<i>Tectona grandis</i>) e EWF Comerciais.	44
Figura 12: Processo de obtenção de strands de madeira Balsa. (a) Moinho de discos. (b) Preparação das lascas para serem inseridas na estufa. (c) Estufa utilizada para o processo de secagem.	45
Figura 13: Etapa de produção dos painéis OSB	49
Figura 14: Amostras de painel OSB de madeira Balsa residual de reflorestamento em câmara de intemperismo artificial	56
Figura 15: Etapa de produção dos EWF Balsa.	57
Figura 16: Ensaio de Delaminação em água fria. (a) Secagem em estufa. (b) CP no momento da aferição das delaminações.	59
Figura 17: Ensaio de Resistência ao Esforço Rolante.	60
Figura 18: Ensaio de Dureza Janka. (a) CP posicionado na máquina universal de ensaio (EMIC). (b) CP após realização do ensaio.	61
Figura 19: Ensaio de Abrasão.	61
Figura 20 - Ensaio de Cisalhamento em bloco. (a) CP posicionado na máquina universal de ensaio (EMIC). (b) CP após realização do ensaio.	62
Figura 21: Teste de variação dimensional. (a) Aparato para avaliação da variação dimensional do EWF. (b) Aferição do EWF.	63
Figura 22: Corte transversal de partícula de madeira Balsa residual. (a) Diâmetro dos poros (imagem ampliada 1.500x). (b) Espessura das paredes fibrilares (imagem ampliada 500x).	67

Figura 22: Corte transversal de partícula de madeira Balsa residual. (c) Diâmetro dos vasos (imagem ampliada 200x).	68
Figura 23: Valores da depressão (D) dos EWF (Balsa e Com).....	80
Figura 24: Variação dimensional dos EWF (Balsa e Com).....	81
Figura 25: Resultados da abrasão com base na perda dimensional (a) e perda de massa (b).	82
Figura 26: Valores médios de Dureza Janka de EWF (Balsa e Com).....	83
Figura 27: Resultados da resistência ao cisalhamento em bloco de EWF (Balsa e Com)	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composições constituintes do estudo das micropartículas.....	41
Tabela 2: Amostras por composição e por tipo de ensaio experimental.	54
Tabela 3: Normas estabelecidas das classes para piso de madeira.....	58
Tabela 4: Quantidade de amostras por composição e por tipo de ensaio dos EWF	64
Tabela 5: Valores médios das propriedades físicas e química da madeira Balsa residual e outras madeiras	65
Tabela 6: Valores médios das propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de ZnO	70
Tabela 7: Valores médios das propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de Al ₂ O ₃	72
Tabela 8: Valores médios da propriedade térmica de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de Al ₂ O ₃	74
Tabela 9: Valores médios das propriedade térmica de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de ZnO.....	75
Tabela 10: IE e AI de amostras antes e após ensaio de intemperismo acelerado.....	76
Tabela 11: Resultados do teste de contraste de médias de Tukey	77
Tabela 12: Quantidade de amostras aceitas e não aceitas após cada ciclo de delaminação para EWF (Balsa e Com.).....	78
Tabela 13: Síntese dos resultados do inchamento em espessuras após 24 horas de imersão em água (IE-24h)	98
Tabela 14: Síntese dos resultados do módulo de ruptura a flexão na direção longitudinal (MOR-L).....	98
Tabela 15: Síntese dos resultados do módulo de elasticidade a flexão na direção longitudinal (MOE-L)	98
Tabela 16: Síntese dos resultados do módulo de ruptura a flexão na direção transversal (MOR-T).....	98
Tabela 17: Síntese dos resultados do módulo de elasticidade a flexão na direção transversal (MOE-T).....	99
Tabela 18: Síntese dos resultados da resistência a tração perpendicular (TP)	99
Tabela 19: Síntese dos resultados da condutividade térmica (λ).....	99
Tabela 20: Painéis para usos gerais, incluindo mobiliário, interiores, utilizados em ambiente seco	100

Tabela 21: Painéis para fins estruturais utilizados em ambiente seco - requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento.....	100
Tabela 22: Painéis para fins estruturais utilizados em ambiente úmido - requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento	101
Tabela 23: Painéis para fins estruturais especiais utilizados em ambiente úmido - requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABr: Abrasão

AI: Adesão interna

Al₂O₃: Óxido de Alumínio

ASTM: American Society for Testing and Materials

BFP: Biomassa florestal primária

BFS: Biomassa florestal secundária

Cis-BI: Cisalhamento em bloco

Com: Comercial

CP: Corpo de prova

CV: Coeficiente de variação

C1-A: Composição com micropartícula de Al₂O₃ (1%)

C2-A: Composição com micropartícula de Al₂O₃ (2%)

C3-A: Composição com micropartícula de Al₂O₃ (3%)

C1-Z: Composição com micropartícula de ZnO (1%)

C2-Z: Composição com micropartícula de ZnO (2%)

C3-Z: Composição com micropartícula de ZnO (3%)

C-Ref: Composição referência

D: Depressão

DAF: Delaminação em água fria

DAP: Diâmetro à altura do peito

EMIC: Fabricante de máquinas universais de ensaios.

et al: "entre outros", tradução livre do latim usada para citar artigos escritos por mais de três autores.

EN: Norma européia

EWf: Engineered wood flooring

FF: Fenol-formaldeído

GPa: Giga Pascal – unidade de medida utilizada para Tensão

H: Entalpia

IE: Inchamento em espessura

MDP: Medium Density Particleboard.

MEV: Microscopia Eletrônica por Varredura.

MOR: Módulo de ruptura

MOE: Módulo de elasticidade

MPa: Mega Pascal - unidade de medida utilizada para Tensão.

NBR: Norma Brasileira de Regulamentação

OSB: Oriented Strand Board.

pH: "Potencial Hidrogeniônico", uma escala logarítmica que mede o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada solução.

PU de mamona: Resina Poliuretana a base de óleo de Mamona.

RER: Resistência ao Esforço Rolante

UF: Uréia-formaldeído

VD: Variação dimensional

ZnO: Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
1.2 Justificativa.....	19
2 OBJETIVOS.....	20
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
3.1 Estado da Arte de Painéis OSB - Levantamento Bibliométrico.....	21
3.2 Madeira Balsa.....	25
3.3 Painéis de Madeira Reconstituída.....	27
3.4 Painel OSB	29
3.4.1. Adesivos para Produção de Painéis OSB	31
3.4.2. Parâmetros de Produção para Painéis OSB.....	33
3.5 Nano e Micropartículas	34
3.6 Pisos de Madeira.....	36
3.7 Conclusões da Revisão da Literatura.....	38
4 METODOLOGIA.....	40
4.1 Etapas do projeto.	40
4.2 Materiais.....	43
4.3 Métodos	44
4.3.1 Primeira etapa – Preparação e Avaliação do Potencial da Madeira Balsa.	44
4.3.1.1 Obtenção e Preparação dos Strands de Madeira Balsa.....	44
4.3.1.2 Composição Química.	45
4.3.1.3 pH.	46
4.3.1.4 Densidade Aparente.....	46
4.3.1.5 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV).....	47
4.3.2. Segunda etapa – Estudo para Otimizar o Teor de Micropartículas na Produção de Painéis OSB.....	47
4.3.2.1 Produção dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual	47
4.3.2.2 Caracterização dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual.	49
4.3.2.2.1 Caracterização Física.....	50
4.3.2.2.2. Inchamento em Espessura 24 horas.....	50
4.3.2.2.3 Caracterização Mecânica.....	51
4.3.2.2.4 Flexão Estática.....	51
4.3.2.2.5 Tração Perpendicular	53

4.3.2.2.6 Caracterização Térmica	53
4.3.2.2.7 Condutividade Térmica	53
4.3.2.3 Análise Estatística das Propriedades Físicas e Mecânicas e Seleção do Teor de Micropartículas	54
4.3.2.4 Estudo da Durabilidade dos Painéis OSB	55
4.3.3.Terceira etapa - Desenvolvimento e Análise de Desempenho de um Piso Engenheirado (EWF Balsa).....	56
4.3.3.1 Produção dos EWF Balsa	56
4.3.3.2 Caracterização dos Pisos Engenheirados (EWF Balsa e EWF Com).....	57
4.3.3.3 Ensaio Físico	59
4.3.3.4 Delaminação em Água Fria	59
4.3.3.5 Ensaio Mecânicos	59
4.3.3.6 Resistência ao Esforço Rolante	59
4.3.3.7 Dureza Janka.....	60
4.3.3.8 Abrasão.....	61
4.3.3.9 Cisalhamento em Bloco.....	62
4.3.3.10 Avaliação da Variação Dimensional do Piso	62
4.3.3.11 Análise de Desempenho dos EWF Balsa e EWF Com	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 Primeira Etapa – Caracterização da Matéria-Prima	65
5.1.1 Propriedades Físicas e Químicas da Madeira Balsa Residual	65
5.1.2 Análise Microestrutural da Madeira Balsa Residual	66
5.1.3 Considerações Parciais da Primeira Etapa.....	69
5.2 Segunda Etapa – Caracterização dos Painéis OSB com Micropartículas Incorporadas	69
5.2.1 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual Incorporados com Micropartículas de ZnO.....	70
5.2.2 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual Incorporados com Micropartículas de Al ₂ O ₃	71
5.2.3 Propriedade Térmica dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual com Micropartículas de ZnO e Al ₂ O ₃ Incorporadas.....	74
5.2.4 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual após Ensaio de Intemperismo Acelerado	76
5.2.5 Considerações Parciais da Segunda Etapa.....	77

5.3 Terceira Etapa – Análise de Desempenho dos Pisos Engenheirados (EWF Balsa e Com).....	78
5.3.1 Delaminação em Água Fria	78
5.3.2 Resistência ao Esforço Rolante	79
5.3.3 Variação Dimensional	81
5.3.4 Abrasão.....	82
5.3.5 Dureza Janka.....	83
5.3.6 Cisalhamento em Bloco.....	84
5.3.7 Considerações Parciais da Terceira Etapa.....	85
6 CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE 1 – TABELAS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS PAINÉIS OSB	98
ANEXO 1 – TABELAS DA EN 300:2002	100

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Diversas pesquisas desenvolvidas nos últimos anos, em diferentes regiões do mundo, têm explorado o uso de matéria-prima fibrosa oriunda de subprodutos agroindustriais ou da biomassa florestal para a produção de painéis de partículas aglomerados com resina orgânica ou inorgânica, os quais apresentam resultados que permitem sua aplicação em diferentes áreas (KHALIL et al., 2010, MENDES et al., 2010; ORTUNO et al., 2011; VARANDA et al., 2014; RONQUIM et al., 2014; CRAVO et al., 2015; CHRISTOFORO et al., 2015; MACEDO et al., 2016), agregando valor ao resíduo e proporcionando um destino mais sustentável para essa matéria prima.

Dentre esses subprodutos há a madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*), que segundo Daniels (2013) apresenta baixa densidade (120 kg/m^3 a 200 kg/m^3), elevada taxa de crescimento (18 a 25 metros de altura em aproximadamente 7 anos - FINGER et al., 2012) e propriedades mecânicas que podem atingir 8 GPa de módulo de elasticidade e 70 MPa de módulo de ruptura na flexão estática (BORREGA et al., 2015). Dados presentes na literatura (FERREIRA; CARRASCO; HELMEISTER, 1989) mostram que cerca de 50 a 60% de resíduo são gerados nas etapas de processamento da madeira Balsa.

Acredita-se que a construção civil seja uma das indústrias mais produtivas para o desenvolvimento econômico e social (KARPINSKI et al., 2009). Com isso, a introdução de novos materiais nesse setor provocou avanços tecnológicos relevantes, especialmente na utilização de materiais compósitos. Um desses materiais é o painel de partículas orientadas ou OSB (*Oriented Standard Board*), caracterizado como painel estrutural com propriedades de resistência e rigidez que são semelhantes ao compensado, mas por ser uma opção mais econômica começou a ocupar nichos de mercado antes exclusivos aos compensados, como material de construção, mobiliário, fechamentos, entre outros (JANSSENS, 1998).

Na construção civil, os painéis OSB são utilizados geralmente em aplicações de contrapiso, pisos, fechamentos de parede e telhado. As maiores preocupações para o uso dos painéis como elementos construtivos referem-se à ação das intempéries sobre o material, uma vez que recomenda-se o uso do OSB em ambientes seco uma vez que o contato com a umidade, especialmente nas bordas, pode causar o inchamento substancial dos painéis. Lopes Junior et al. (2021) afirmam que os resíduos de madeira

Balsa apresentam potencial para fabricação de painéis OSB, uma vez que essa espécie apresenta baixa densidade. Pela existência de correlação entre densidade e porosidade, madeiras menos densas tendem a ser mais porosas, e isso é benéfico no sentido de aumentar a adesão ou a ancoragem da fase matriz a fase reforçadora.

Taylor et al. (2008) sustenta que os painéis OSB quando utilizados como uma base para revestimentos de piso ou contrapiso, se tiverem contato direto com água, podem sofrer inchamento nas bordas, formando uma superfície irregular que pode decorrer na necessidade de lixar todo o material para alcançar uma superfície plana e uniforme antes da instalação do piso, processo que representa um alto custo na execução de uma construção. Com isso, alguns fabricantes a fim de solucionar o efeito indesejado de inchamento desenvolveram painéis OSB "aprimorados" para uso em piso. Para isso, aumentaram o teor de resina dos painéis tendo como consequência a diminuição do inchamento do material.

Além dos fatores ligados diretamente a matéria-prima, também existem estudos propondo alternativas para os adesivos comerciais e o uso de aditivos alternativos visando melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas. Um tipo de adesivo alternativo para produção de painéis são as resinas poliuretanas pois apresentam características mecânicas superiores aos adesivos à base de formaldeído, com vantagens de apresentar melhor resistência à umidade, 100% de sólidos, não emitir formol e podem ser obtidas de fontes naturais renováveis como a mamona (DIAS, 2005).

Na área de aditivos alternativos, uma inovação é a utilização de nanopartículas, uma vez que os materiais em escala nanométrica, quando incorporados à macropartículas podem proporcionar novas propriedades a esses materiais (DURÁN et al., 2006). Além das nanopartículas, outra opção de aditivos alternativos que também proporcionam propriedades novas aos materiais são as micropartículas.

Neste contexto, as micropartículas são exemplos de materiais que quando associadas à macropartículas formam um compósito com melhores propriedades físicas e mecânicas. Com isso, a pesquisa sobre a síntese desses materiais está focada principalmente no controle de suas formas, tamanhos, composições e métodos de dispersão nos materiais que serão incorporados. Cada um desses fatores é fundamental para determinar as propriedades dos materiais e levar a diferentes aplicações tecnológicas (GHORBANI et al., 2017).

No entanto, quando o tema é pisos constituídos de biomassa florestal residual, as propriedades físicas desse produto mostram-se sensíveis a variação da umidade. Assim, a incorporação de micropartículas na formulação desse material deve ser investigada.

1.2. Justificativa

Sendo assim, o presente trabalho apresentou como ineditismo a utilização de matérias-primas não convencionais (madeira Balsa residual) para produção de painéis OSB aglomerados com resina PU de mamona e micropartículas de Al_2O_3 e ZnO incorporadas para aplicação deste painel no desenvolvimento de um piso engenheirado para a construção civil.

Dentro desse escopo, a problemática a ser tratada nesse projeto de pesquisa refere-se à superação das deficiências inerentes a adaptação e otimização dos parâmetros de produção (pressão, temperatura, tempo de prensagem e teor de micropartículas) e do produto final (propriedades físico-mecânicas) de painel OSB aglomerados com matriz orgânica para uso como pisos engenheirados.

Sendo assim, a hipótese dessa pesquisa permeia a afirmação: “É viável a produção de painéis OSB com matérias primas não convencionais incorporadas com micropartículas metálicas e a aplicação desse material como piso na construção civil”.

2. OBJETIVOS

- Objetivo geral:

Selecionar uma composição de painel OSB (*Oriented Standard Board*) de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*) residual com adição de micropartículas de ZnO ou Al₂O₃ para aplicação como camada de suporte de piso e avaliar o desempenho físico e mecânico de um piso engenheirado.

- Objetivos Específicos:

- Determinar a melhor composição de micropartículas de Al₂O₃ ou ZnO a ser incorporada em painéis OSB de partículas de madeira Balsa residual aglomeradas com resina PU de mamona para uso como camada de suporte de piso;

- Avaliar o desempenho físico e mecânico do piso engenheirado produzido com a melhor composição de micropartículas incorporadas nos painéis OSB de madeira Balsa residual.

3. REVISÃO DA LITERATURA

O capítulo a seguir apresenta informações da literatura referentes à madeira Balsa, painéis de madeira reconstituída, painéis de partículas orientadas (OSB), micropartículas aplicadas em painéis, pisos de madeira e busca contextualizar o estado da arte referente a essa área do conhecimento.

3.1. Estado da Arte de Painéis OSB - Levantamento Bibliométrico

Para fundamentar o tema proposto nessa pesquisa, foi realizado um levantamento bibliográfico nas bases de dados Scopus e Web of Science, com o intuito de unir informações referentes ao desenvolvimento científico sobre os painéis de partículas orientadas (*OSB panel*); identificar a evolução das pesquisas com madeira Balsa (*Balsa wood*) como matéria-prima na produção de painéis; buscar os conceitos acerca de micropartículas como aditivos na produção dos painéis (*microparticles*); como também estimar a quantidade de pesquisas relacionadas com a produção de pisos de madeira (*woodfloor*) a partir de painéis OSB, na intenção de apurar os resultados e comprovar o ineditismo do tema tratado nesta pesquisa.

Dessa forma, essa busca dividiu-se em quatro etapas e utilizou-se as seguintes palavras, respectivamente:

1. *OSB panel* (isoladamente)
2. *OSB panel; Balsa wood* (combinadamente)
3. *OSB panel; floor* (combinadamente)
4. *OSB panel; Microparticles; floor* (combinadamente)

Sendo que as palavras utilizadas na busca deveriam estar presentes no título, resumo ou palavras-chave dos trabalhos científicos.

Na primeira etapa (Figura 1) foi possível observar que as pesquisas científicas acerca de painéis OSB começaram a ter notoriedade a partir da década de 1990, sendo mais de 100 artigos publicados no período. Sendo que as publicações se mantiveram crescente até 2011 e no período atual houve um ligeiro aumento na quantidade total de trabalhos científicos publicados.

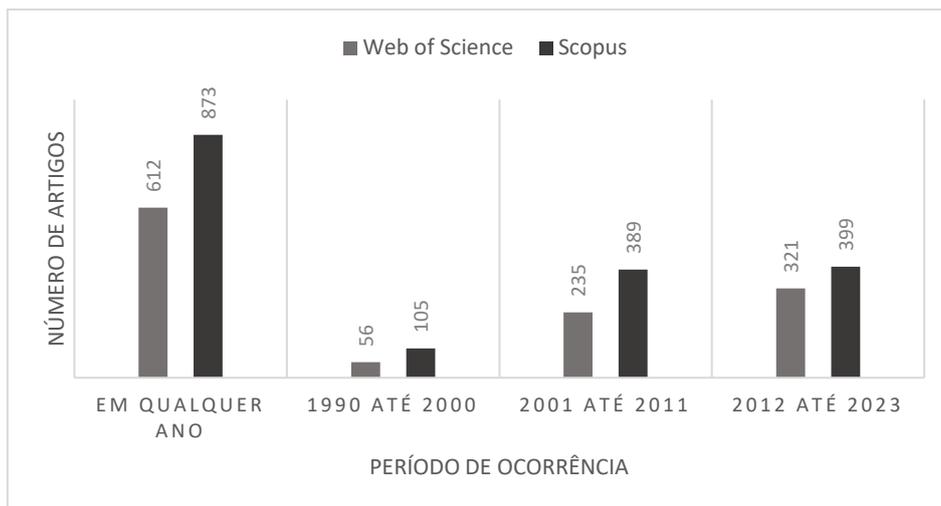


Figura 1 - Artigos publicados com o termo “OSB panel”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE

Fonte: Próprio autor

Para a segunda etapa da pesquisa bibliográfica (Figura 2), com o intuito de buscar artigos que tratassem do tema de painel de partículas orientadas (OSB) relacionados com a madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*), foi utilizada a palavra-chave “OSB panel” combinada com partículas de madeira Balsa “Balsa wood”. Como resultado, foi possível encontrar apenas 8 artigos. O primeiro trabalho encontrado foi do Barbirato et al., 2018, onde os autores avaliam duas densidades diferentes de painel OSB com madeira Balsa residual com dois teores de resina. Em 2021, Lopes Júnior et al. (2021) avaliaram o desempenho físico-mecânico de painéis OSB de madeira Balsa residual com diferentes teores (13%, 15% e 18%) das resinas comercialmente utilizadas ureia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (FF), além de uma resina alternativa, a PU de mamona. Também em 2021, por meio de modelagem via o Método dos Elementos Finitos, Soriano et al. (2021) avaliaram a obtenção dos módulos de elasticidade equivalentes a cada camada do painel OSB de madeira Balsa residual.

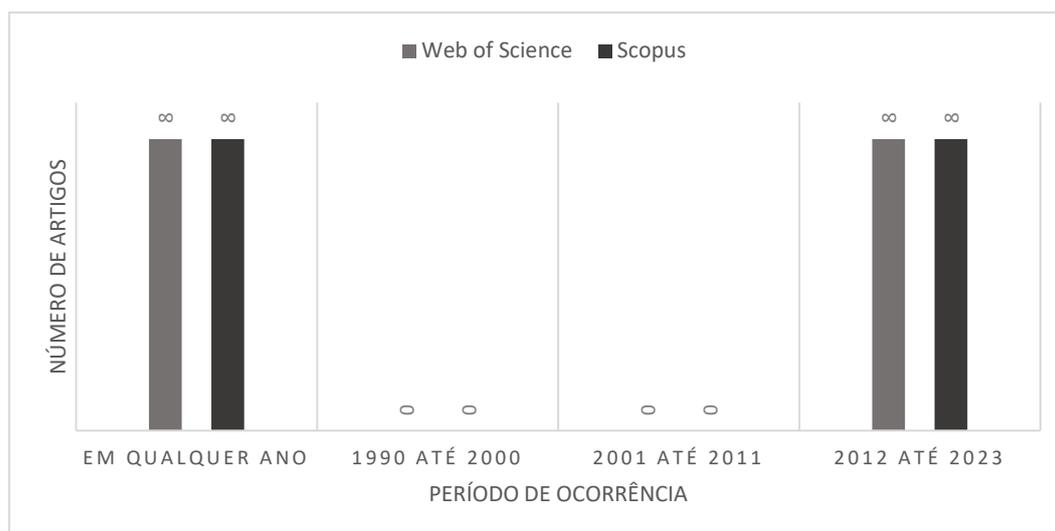


Figura 2 - Artigos publicados com o termo “*OSB panel; Balsa wood*”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE

Fonte: Próprio autor

Na terceira etapa (Figura 3), assim como na etapa anterior, foi possível observar que as pesquisas acerca de painéis OSB e pisos de madeira são encontradas no meio científico a menos de três décadas. Dito isso, foi realizado a busca de artigos que tratassem o tema de painel de partículas orientadas, usando a palavra-chave “*OSB panel*” combinado com a aplicação do estudo em questão de pisos de madeira, utilizando a palavra-chave “*Wood floor*”. Ao todo foram encontrados mais de 100 trabalhos científicos publicados. Entretanto, até os anos 2000 foram publicados apenas 14 trabalhos. Sendo que as publicações se mantêm em crescimento até hoje, ganhando maior notoriedade no segundo período (2001-2011) com ligeiro aumento no último período analisado (2012-2023).

Pozzer (2020) avaliaram o potencial uso de partículas de bagaço de cana-de-açúcar aglomeradas com resina PU de mamona para a produção de painéis sanduíche trapezoidais para construção civil. Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas foram semelhantes aos painéis OSB comerciais, apresentando potencial de vedação, estrutural e aplicações de revestimento, como piso. Esses dados mostram que a utilização de resíduos de materiais agroindustriais representam um campo de pesquisa com potencial para ser explorado, assim como a resina PU de mamona utilizada durante o estudo.

Varanda et al. (2018) avaliaram o desempenho físico-mecânico de painéis de partículas homogêneos de alta densidade, com resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e casca de aveia (*Avena sativa*) para aplicação em pisos e comparou com três espécies de

madeira tropical (Angelim Vermelho, Cumaru e Jatobá). Os resultados obtidos para os painéis de partículas destinados a uso em pisos apresentaram desempenho semelhante às três espécies de madeira, na maioria das propriedades avaliadas, evidenciando a potencialidade dos painéis produzidos para aplicação na indústria de pisos engenheirados.

Campos Filho et al. (2023) avaliaram painéis OSB de madeira residual de reflorestamento de média densidade (650 kg/m^3), 13% de resina PU de mamona com 1% de nanopartículas de Al_2O_3 de origem comercial e fabricadas em laboratório pelo método sol-gel proteico. Os resultados mostraram que as nanopartículas comerciais de Al_2O_3 proporcionaram melhor desempenho nas análises microestruturais e qualitativas, além de proporcionar uma melhor eficiência na etapa de cura da resina e um aumento nos valores das propriedades mecânicas no sentido transversal para o módulo de ruptura (69,15%) e adesão interna das partículas de madeira (53,57%).

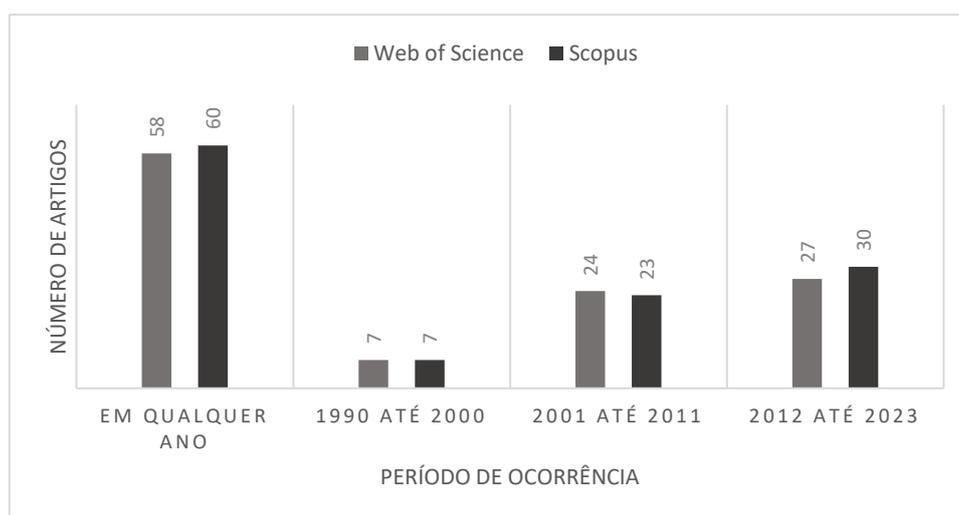


Figura 3 - Artigos publicados com o termo “*OSB panel; floor*”, bases de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE
Fonte: Próprio autor

Na etapa 4, visto que na literatura nacional e internacional não foram encontradas pesquisas com enfoque no uso de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*) residual como matéria-prima de painéis OSB com micropartículas incorporadas para uso como camada de suporte de EWF (*engineered wood flooring*) em aplicações para piso, assim está o ineditismo desta pesquisa. Além disso, essa proposta de estudo justifica-se uma vez que, viabilizará a utilização de resíduos do processamento da indústria madeireira promovendo a valorização desse subproduto, por meio da disponibilização de um piso

engenhariado (EWF de madeira Balsa residual) como novo material para o mercado da construção civil.

3.2. Madeira Balsa

A espécie *Ochroma pyramidale*, também conhecida como Balsa ou Pau-de-Balsa, é caracterizada por ser uma madeira de baixa densidade, extremamente leve e tem sido utilizada na recomposição de áreas degradadas de florestas naturais graças ao seu acelerado ritmo de crescimento e boa tolerância à luz solar direta (LORENZI, 1992).

Segundo Fernández (2010) a velocidade de crescimento da madeira Balsa é alta, sendo superada apenas pela espécie chinesa de bambu (*Bambusa vulgaris Schrad*). Em aproximadamente sete anos, o pé de madeira Balsa pode alcançar uma altura de 18 a 25m, DAP (diâmetro à altura do peito) de 50cm e IMA (incremento médio anual) volumétrico de 17 a 30 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Além do mais, tem como característica o fuste reto, cilíndrico e livre de ramas até 15m de altura ou mais, sendo a sua copa aberta, casca lisa e acinzentada, mosqueada de branco a pardo, como mostrado na Figura 4 (FINGER, LOGSDON e ROCHA, 2012).



Figura 4 - Árvores de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*)
Fonte: Próprio autor

Daniels (2013) defende que a densidade da Balsa pode variar de 100 kg/m³ até 380 kg/m³, sendo mais comum variar de 120 kg/m³ a 200 kg/m³. Para Hellmeister (1982), o solo e clima do local de onde a árvore é originada, a classificação botânica,

sua fisiologia, a anatomia do tecido lenhoso e a variação química, são fatores preponderantes que influenciam nas características físicas da madeira. Por outro lado, a constituição anatômica da madeira influencia diretamente seu comportamento à compressão, tração, flexão, cisalhamento, fendilhamento, retração, inchamento, e no tratamento com preservativo.

Por ser macia, homogênea e de boa trabalhabilidade, costuma ser utilizada em aeromodelismo, trabalhos manuais, brinquedos e embalagens. Apresenta alta flutuabilidade, o que a qualifica como um bom material para a construção de barcos, bóias e coletes salva-vidas em substituição à cortiça (LOUREIRO, SILVA e ALENCAR, 1979). A Balsa também é utilizada para obtenção de celulose, a atividade se torna atrativa devido as características da madeira, pois suas fibras são longas e possuem rendimento celulósico entre 45 e 50%. Além do mais, apresenta fácil branqueamento devido à cor clara da madeira e baixos teores de lignina (LAMPRECHT, 1990). As propriedades mecânicas da Balsa foram modeladas, particularmente na compressão, considerando que sua estrutura é semelhante a um favo de mel (EASTERLING et al., 1982, GIBSON & ASHBY, 1997; VURAL; RAVICHANDRAN, 2003; DA SILVA; KYRIAKIDES, 2007).

De acordo com Borrega, Ahvenainen e Gibson (2015) as propriedades mecânicas da madeira Balsa podem atingir valores até 8 GPa para módulo de elasticidade e 70 MPa para o módulo de ruptura nas maiores densidades. Estas propriedades mecânicas relativamente altas da madeira Balsa em relação a outros materiais compósitos a torna atraente para utilização como partículas constituintes de painéis OSB.

Apesar do grande potencial que possui, o Pau-de-Balsa ainda busca a consolidação e ampliação de seu mercado no Brasil. Com isso, nos últimos anos, algumas pesquisas acadêmicas têm proposto a utilização de subprodutos para produção de painéis de partículas e demonstram viabilidade. Hellmeister (2018) avaliou painéis OSB (*Oriented Strand Board*) planos de 10 mm de espessura constituído de resíduo de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*) proveniente de reflorestamento, aglomerados com resinas UF, FF e PU de mamona. O autor avaliou painéis de baixa (350 e 500 kg/m³) e média densidade (650 kg/m³), utilizando teor de resina em massa de partícula de 8% para UF e FF e 12% para a resina PU de mamona. Os resultados obtidos pelo autor demonstraram que os painéis OSB de madeira Balsa residual aglomerados com resina PU de mamona atingiram as recomendações para painéis OSB tipo 2, de uso

interno e não estrutural da norma europeia EN 300:2006 – *Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications*.

Barbirato et al. (2019) estudou o desempenho mecânico de painéis OSB com madeira Balsa residual com três densidades diferentes (300, 400 e 650 kg/m³) e dois teores de resina (11 e 15%). Foram realizados ensaios de baixa velocidade de impacto, flexão estática 4 pontos e profilometria. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que os painéis com maior densidade suportaram uma maior quantidade de carga em termos de força de pico e energia de perfuração. Ambas as propriedades claramente influenciadas pela melhor compactação das partículas.

Lopes Junior et al. (2021) avaliou o desempenho de painéis OSB de madeira Balsa residual, de média densidade (650 kg/m³) com diferentes teores (13%, 15% e 18%) de resina PU de mamona, FF e UF. Os resultados obtidos indicaram que os painéis produzidos com 13% de resina PU de mamona e FF apresentaram melhor desempenho físico e mecânico e foram classificados, segundo recomendações da EN 300:2002, como painéis OSB do tipo 2, com indicativo de usos gerais, incluindo-se mobiliário e aplicações em ambientes internos, sem contato com fontes de umidade.

3.3. Painéis de Madeira Reconstituída

O processo evolutivo da indústria madeireira trouxe vários benefícios, podendo-se destacar a possibilidade de processamento da madeira e transformação de toras em vigas e tábuas de grandes dimensões. Porém, com o passar dos anos ocorreu uma diminuição da disponibilidade de árvores de grande porte e o aumento do custo da madeira bruta. A partir desse cenário, o desenvolvimento dos painéis à base de madeira reconstituída, produzidos a partir de árvores de menores diâmetros, até mesmo a utilização de resíduos de madeira já processada, mostraram-se viáveis e promissores (IRLE et al., 2012; BARBOSA et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2016). A Figura 5 apresenta de forma simplificada um organograma representando os principais tipos de painéis de madeira.

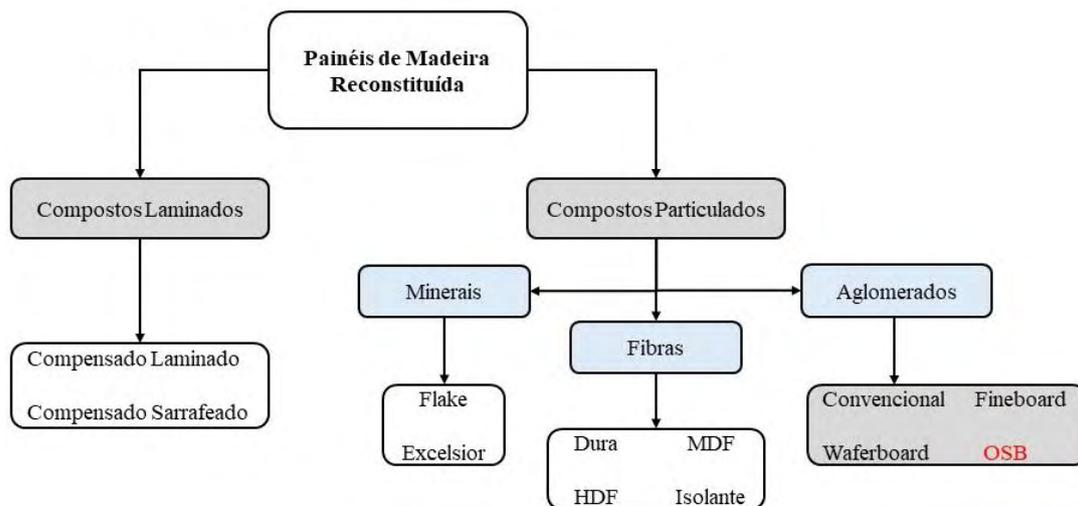


Figura 5- Tipos de painéis de madeira reconstituída
 Fonte: Adaptado de Iwakiri (2005).

Segundo Iwakiri (2005) os painéis de madeira podem ser definidos como produtos compostos de elementos oriundos de madeira como lâminas, sarrafos, partículas e fibras, obtidos a partir da redução da madeira sólida, reconstituídos por meio de ligação adesiva.

No ano seguinte, Bonduelle e Iwakiri (2006) identificaram que para os painéis compensados apenas 48% da tora em média é aproveitada nas operações de laminação durante a fabricação. Antes da etapa de laminação, os autores afirmam que é necessário o arredondamento das toras para possibilitar a delaminação e posterior fabricação de compensados. Ao fim da pesquisa, os autores concluíram que, aproximadamente, 50% de toda a madeira utilizada na fabricação de compensados e no processamento de madeira maciça é descartada na forma de resíduos. Em outro trabalho, Oliveira (2012) destaca que os roletes, sobras de guilhotina, resíduos de esquadrejamento, lâminas de desbaste, casca e sobras de destopo de toras, são resíduos gerados pela indústria madeireira e não utilizados na fabricação de compensados.

O reaproveitamento de resíduos oriundos do processamento de madeira maciça e da laminação de madeira para fabricação de compensados resultou no desenvolvimento de painéis particulados que, ao contrário dos painéis compensados, não dependem de troncos retos ou de grandes diâmetros para sua fabricação (HELLMEISTER, 2017). Neste cenário, a produção de painéis OSB tem crescido e ocupado espaços antes exclusivos dos compensados, em virtude de fatores como redução da disponibilidade de toras de boa qualidade para laminação, uso de toras de qualidade inferior provenientes de espécies de baixo valor comercial e a largura e o comprimento dos painéis OSB são

determinados pela tecnologia de produção e não em função do comprimento da madeira de desdobro, como no caso dos painéis compensados (CLOUTIER, 1998).

3.4. Painel OSB

Historicamente, os painéis estruturais dos tipos "waferboard" e "oriented strand board" ou OSB começaram a surgir em meados da década de 1970 (IWAKIRI, 2005). A partir da década de 1980, o uso de painéis OSB foi largamente difundido, resultando no aumento expressivo de novas unidades produtoras em todas as regiões do mundo. No Brasil, a primeira fábrica de painéis OSB, instalada no estado do Paraná, iniciou a sua produção em 2002 com capacidade de 350.000 m³/ano (IWAKIRI, 2004).

Os painéis OSB desde que entraram no mercado tiveram como concorrente os compensados, que requerem toras de alta qualidade para a sua manufatura e, por isso, são de custo relativamente superior (BORTOLETTO JÚNIOR e GARCIA, 2004). A possibilidade do painel OSB ser produzidos com toras de qualidade inferior, bem como apresentar menor custo de produção e possuir propriedades suficientes para diversos usos, são fatores que fizeram que esse tipo de painel ocupe nichos de mercado antes exclusivos aos compensados, como material de construção, mobiliário, fechamentos, entre outros (JANSSENS, 1998).

Em países da América do Norte, 51% das aplicações do OSB ocorrem em construções habitacionais. Nos Estados Unidos, este painel está presente nas habitações, utilizado em paredes internas e externas, pisos e forros, com desempenho altamente satisfatório. O vasto emprego deste painel se deve à rapidez e à facilidade de instalação, além de uma grande economia de energia em comparação com as construções convencionais (REMADE, 2007; DOS SANTOS; AGUILAR, 2007).

O OSB pode ser definido como um painel de partículas de madeira orientadas, finas e longas (*strands*), consolidadas pelo uso de resinas, calor e pressão (BORTOLETTO JÚNIOR e GARCIA, 2004). O painel OSB é tipicamente formado por três camadas de partículas, sendo que na camada interna o alinhamento é perpendicular à direção de formação do painel, enquanto nas camadas externas o alinhamento é paralelo (TSOUMIS, 1991).

A geometria das partículas "*strand*" possui relação direta entre comprimento/largura, sem contar que a sua orientação e formação em três camadas cruzadas (face-centro-face) (Figura 6), conferem aos painéis OSB maior resistência à flexão estática e melhor estabilidade dimensional (MALONEY, 1993).

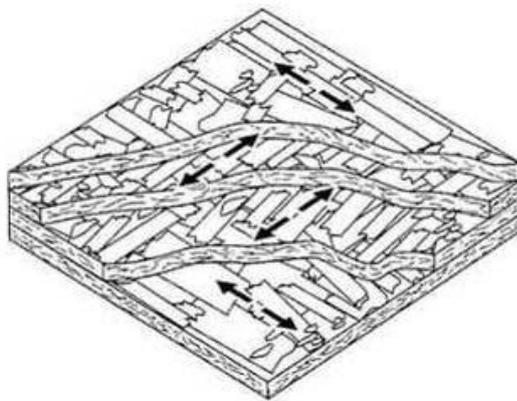


Figura 6 - Orientação das lascas na produção dos painéis
Fonte: Portal da madeira, 2008.

Estudos sobre propriedades, produção e a influência de variáveis de processamento de painéis OSB, a partir de espécies do gênero *Pinus* plantadas no país, foram realizados por vários autores, dentre eles: Iwakiri (1989); Brito (1995); Mendes et al. (2003); Bortoletto Júnior e Garcia (2004); Saldanha (2004); Iwakiri et al. (2009).

Em seu estudo Silva (2006) enumera diversas vantagens do OSB em relação aos painéis compensados, enquanto Garay (2009) cita algumas desvantagens da utilização dos painéis OSB, dentre elas:

Vantagens:

- Maior aproveitamento das toras de madeira (OSB utiliza aproximadamente 96% do total da tora contra 56% do compensado), isso reflete no baixo custo do material e proporciona um produto ecologicamente mais eficiente.
- Possibilita a utilização de toras mais finas (6 anos para o OSB contra 14 anos para o compensado) e de espécies com menor valor comercial.
- Maior produtividade pelo fato de que é possível automatizar todo processo de fabricação dos painéis OSB, de forma contínua e em grande escala.

Desvantagens:

- É um material fundamentalmente heterogêneo e anisotrópico. Mesmo depois de transformada, quando já empregue na construção, a madeira é muito sensível ao ambiente, aumentando ou diminuindo de dimensões com as variações de umidade.
- Bastante vulnerável aos agentes externos, e a sua durabilidade é limitada, quando não são tomadas medidas preventivas.

Bufalino et al. (2015) avaliaram a viabilidade de se utilizar e misturar madeiras de *Toonaciliata*, *Eucalyptus grandis/urophylla* e *Pinus oocarpa* na produção de painéis OSB. Foi utilizado o adesivo FF, a uma proporção de 9% para todos os tratamentos. Utilizaram uma proporção percentual de massa de 25/50/25% para face/miolo/face. A maioria dos painéis OSB não atingiram plenamente aos requisitos especificados pela norma EN 300:2002 para as propriedades físicas e mecânicas. Os painéis OSB fabricados com madeiras de *Eucalyptus grandis/urophylla* e *Pinus oocarpa* têm potencial para serem comercializadas como OSB tipo 1 (utilizados para interiores, mobiliário e ambiente seco) e OSB tipo 1 (utilizado para não estruturais e ambiente seco), respectivamente. Já, para os painéis feitos com madeira de *Toonaciliata* na face e madeira de *Eucalyptus grandis/urophylla* no miolo, atenderam aos requisitos estabelecidos para OSB tipo 1.

Ferro et al. (2015) investigaram a viabilidade da produção de painéis OSB com partículas de madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum*) aderidas com resina PU de mamona. Foram avaliados três teores de resina (8%, 10% e 12%). Os painéis atingiram propriedades físicas e mecânicas que atenderam aos documentos normativos nacionais (ABNT NBR 14810-2:2013) e internacionais (EN 300:2006). Porém, vale ressaltar que os painéis fabricados com 8% de resina mostraram-se como melhores soluções, por apresentarem melhor desempenho, utilizando menor quantidade de adesivo na confecção dos painéis.

Barbirato et al. (2018) apresentaram um estudo de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir de resíduos de madeira Balsa aglomeradas com resina PU de mamona. Os autores avaliaram painéis com diferentes densidades (300 kg/m^3 e 400 kg/m^3) em diferentes teores (11% e 15%). Os resultados obtidos indicam que apenas os painéis de 400 kg/m^3 de densidade e 15% de resina atingiram as exigências para ser classificado como OSB tipo 1, segundo recomendações da norma europeia EN 300:2002.

3.4.1. Adesivos para Produção de Painéis OSB

O adesivo é de fundamental importância na produção de painéis de partículas devido às implicações técnicas e econômicas, uma vez que a resina pode representar 50% do custo da produção (CARNEIRO et al., 2004). Dependendo da característica dos adesivos, a classificação pode ser realizada considerando a origem das matérias-primas, temperatura de cura, resistência à umidade, composição química entre outras. Dentro destas classificações há os adesivos inorgânicos ou sintéticos, que geralmente estão

constituídos por silicatos e possuem elevadas propriedades mecânicas e os adesivos orgânicos que são naturais. Os primeiros são mais utilizados na indústria madeireira, pelas qualidades como resistência mecânica, à umidade e fungos (HELLMEISTER, 2017).

Os adesivos sintéticos também podem ser classificados em termofixos que endurecem pela ação do calor ou catalisadores e sua cura não é reversível (UF, FF e poliuretanos) e em termoplásticos de cura reversível (polietileno, polistírol e borracha sintética). Já, os adesivos orgânicos são obtidos de proteínas animais (BARROS FILHO, 2009; CAMPOS et al., 2009; VICK, 1999).

A indústria de painéis de partículas utiliza com maior frequência a resina UF para produção de painéis não estruturais e de uso interno e as resinas FF e melanina são empregadas na produção de painéis para uso estrutural resistente a umidade. Para obter um balanço entre custo e melhoria das propriedades os fabricantes produziram resinas mistas tais como melanina-ureia-formaldeído (MUF) ou fenol-melanina-ureia-formaldeído (FMUF) (HELLMEISTER, 2017).

Aproximadamente 90% das indústrias de painéis do mundo utilizam UF em porcentagem de 8 a 10% do peso seco das partículas (ELEOTERIO, 2000; IWAKIRI, 2005; MENDES et al., 2010; MELLO DA SILVA, 2003). A desvantagem na utilização desses adesivos está na liberação de formol para o ambiente, o qual é um gás incolor, com forte odor, alta reatividade química e solúvel em água. Esse gás provoca irritação nos olhos, na pele e no trato respiratório (IWAKIRI, 2005; KHODER et al., 2000).

As resinas poliuretanas podem ser utilizadas na produção de painéis de partículas aglomeradas. Este adesivo apresenta características mecânicas superiores aos adesivos à base de formaldeído, com vantagens de apresentar melhor resistência à umidade, 100% de sólidos e não emitir formol (DIAS, 2005). Já as resinas poliuretanas derivadas de vegetais são caracterizadas como “bi-monômeros” e podem ser obtidas de fontes naturais renováveis como soja, milho, girassol, mamona entre outros (PETROVIC, 1999). O desenvolvimento dos poliuretanos derivados de óleo de mamona teve origem na década de 1940, conforme aponta Mutlu (2010). A resina PU de mamona é do tipo bicomponente, composta pelo polioli B1640 e pelo pré-polímero A249, de cura a frio. Após mistura dos componentes, sua viscosidade aumenta e seu tempo de aplicabilidade é próximo de 20 minutos.

Na produção de painéis de partículas é de suma importância observar o tipo e quantidade de resina utilizada, pois esses parâmetros apresentam relação com as

ligações entre a superfície das partículas, propriedades mecânicas e estabilidade do painel (WEBER, 2011).

Lopes Junior et al. (2021) avaliaram o desempenho físico-mecânico de painéis OSB de madeira Balsa residual, com densidade de 650 kg/m³, espessura 10 mm, produzidos com resinas FF, UF e PU de mamona em diferentes teores (13%, 15% e 18%). Os resultados obtidos indicaram que os painéis produzidos com 13% de resina PU de mamona apresentaram melhor desempenho físico e mecânico e foram classificados, segundo recomendações da EN 300:2002, como painéis OSB do tipo 1, com indicativo de usos gerais, incluindo-se mobiliário e aplicações em ambientes internos, sem contato com fontes de umidade. A resina FF também apresentou bons resultados segundo parâmetros da EN 300:2002, porém foram menos significativos quando comparados com a resina PU de mamona. A resina UF nos teores estudados não apresentou desempenho físico e mecânico que atenda às recomendações da EN300:2002.

Nos pisos engenheirados (EWF) o adesivo constitui a camada central do material e sua principal função consiste em aglutinar a camada superficial sobre a camada de suporte. A principal função da camada de suporte é mecânica, pois restringe a deformação da lamela. Na maioria dos casos, nessa fração do EWF são utilizados materiais como os painéis (compensados ou particulados) e até mesmo retalhos de madeira. No entanto, sendo priorizados os painéis, uma vez que estes proporcionam maior estabilidade dimensional ao EWF. No que diz respeito ao adesivo do EWF, um estudo comparativo avaliou quatro diferentes tipos (UF; MUF; polivinil acetato tipo III - PVA e poliuretano - PUR). Os resultados mostraram que o adesivo PUR apresentou o melhor desempenho, seguido pelo UF, MUF e PVA (BLANCHET et al., 2003).

3.4.2. Parâmetros de Produção para Painéis OSB

A norma europeia EN 300:2002 – *Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications* classifica os painéis em 4 classes de uso e indica recomendações mínimas de propriedades físico-mecânicas para painéis OSB (Anexo 1).

De acordo com a norma, os quatro tipos diferenciam-se da seguinte forma:

- OSB/1: Uso interno, não estrutural, para uso em condições sem umidade.
- OSB/2: Uso estrutural, para uso em condições sem umidade.
- OSB/3: Uso estrutural, com presença de umidade.

- OSB/4: Uso severo (*heavy-duty*) com presença de umidade.

A norma europeia (EN 300) indica também os requisitos de valores limites para as propriedades mecânicas de módulo de resistência à flexão e módulo de elasticidade na direção transversal e longitudinal, adesão interna, adesão interna em água fervente e inchamento em espessura após 24 horas, como apresentada no anexo 1. Com isso, o intuito deste estudo foi desenvolver um material que supra as qualidades de painéis OSB requeridas pela norma.

3.5. Nano e Micropartículas

Além dos fatores ligados diretamente a matéria-prima e ao tipo de adesivo, também existem estudos propondo o uso de aditivos alternativos visando melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas. Uma inovação na área de aditivos alternativos é a utilização de nanopartículas, uma vez que os materiais em escala nanométrica, quando incorporados aos materiais macroscópicos, podem proporcionar novas propriedades a esses materiais (DURÁN et al., 2006). Além das nanopartículas, outra opção de aditivos alternativos que também proporcionam propriedades novas aos materiais macroscópicos são as micropartículas.

Neste contexto, as micropartículas são exemplos de materiais que quando associadas à macropartículas formam um compósito com melhores propriedades físicas e mecânicas. Com isso, a pesquisa sobre a síntese desses materiais está focada principalmente no controle de suas formas, tamanhos e composições. Cada um desses fatores é fundamental para determinar as propriedades dos materiais e levar a diferentes aplicações tecnológicas (GHORBANI et al., 2017).

Uma micropartícula é caracterizada por possuir dimensão de 0,1 a 100 μm (micrômetros), existe em grande diversidade, é ligada à sua forma e tamanho, a superfície e a sua natureza química (metais, polímeros, entre outros), ao estado e o meio de dispersão. Todas as propriedades desses materiais estão diretamente ligadas a essas características, principalmente o tamanho das mesmas (LIMA, 2014). Martins (2015) descreve que uma nanopartícula apresenta tamanho de 1 a 100 nm (nanômetros), variando suas propriedades conforme a forma e tamanho, estado, meio ou superfície e a natureza química.

Mantanis & Papadopoulos (2010) afirmam que o tamanho reduzido das micropartículas, como também nanopartículas, existentes em materiais compósitos

permitem que elas penetrem na madeira, alterando efetivamente a química da superfície, resultando em uma elevada proteção contra a umidade.

Silva et al. (2019) avaliaram as propriedades físicas de painéis MDF (*medium density fiberboard*) de média densidade, aglomerados com resina UF e melanina-formaldeído acrescentando 0,5% e 1,0% de nanopartículas de ZnO. Os resultados mostraram que a adição de 0,5% de nanopartículas com resina melanina-formaldeído resultou em painéis de maior densidade, menor teor de umidade e, após imersão em água por 24 horas, menores valores de inchaço na espessura. Estes resultados são explicados pela maior compactação das placas devido à rápida cura do adesivo. O tratamento usando maior porcentagem (1%) de nanopartículas de ZnO não apresentou resultados estatisticamente inferiores aos resultados de 0,5% de nanopartículas.

Kumar et al. (2013) avaliaram os efeitos das nanopartículas de Al_2O_3 nas propriedades físicas, mecânicas e de transferência de calor do MDF. As nanopartículas foram adicionadas em dois níveis, 0,5% e 1,0% do peso seco das fibras de madeira. O perfil da temperatura dentro do painel e a condutividade térmica foram melhorados pela adição de nanopartículas de Al_2O_3 , aumentando subsequentemente a aderência das fibras. O módulo de ruptura e o módulo de elasticidade também foram superiores em relação às amostras de referência e houve redução no inchamento em espessura dos painéis com nanopartículas em relação a referência.

Campos Filho et al. (2023) avaliaram painéis OSB de média densidade (650 kg/m³) de madeira residual de reflorestamento moldada com 13% de resina PU de mamona com 1% de nanopartículas de Al_2O_3 de origem comercial e fabricadas em laboratório pelo método sol-gel proteico. Os resultados indicaram que as nanopartículas comerciais de Al_2O_3 proporcionaram melhor desempenho nas análises microestruturais e qualitativas, além de proporcionar uma melhor eficiência na etapa de cura da resina, causando um aumento nos valores das propriedades mecânicas no sentido transversal para o módulo de ruptura (69,15%) e adesão interna das partículas de madeira (53,57%).

Lopes Junior et al. (2023) avaliaram o desempenho de painéis de madeira reconstituída de partículas orientadas (OSB) de madeira Balsa residual de reflorestamento de média densidade (650 Kg/m³) com incorporação de micropartículas de Al_2O_3 em diferentes porcentagens (1, 2 e 3%) e uma composição sem micropartículas. Os resultados obtidos indicaram que os painéis produzidos com 2% Al_2O_3 apresentaram desempenho físico e mecânico superior após serem submetidos ao

intemperismo acelerado, evidenciando o efeito positivo da incorporação das micropartículas de Al_2O_3 .

Outra função importante do Al_2O_3 é que ele pode ser usado em papel overplay, utilizado para proporcionar resistência à abrasão em pisos laminados. Além do Al_2O_3 , outras nanopartículas como o ZnO podem modificar a superfície das paredes da madeira melhorando a resistência à estabilidade química e a capacidade de repelir e dispersar a água, óleo, bactérias, poeira orgânica, eletricidade, magnetismo e luz (ROUMELI et al., 2012).

As micropartículas possuem grandes áreas de superfície e podem incorporar novas propriedades ou até mesmo modificar propriedades importantes dos painéis de partículas nas quais forem introduzidas. Karimi et al. (2013) relata que a mudança estrutural causada pelo tratamento térmico por alguns materiais em nano e micro-escala, afetam propriedades fungicidas, melhorando a durabilidade biológica da madeira e materiais de madeira-compósito, fator importante na produção de painéis, por exemplo, com destino ao setor da construção civil para utilização em pisos.

No entanto, quando o tema é pisos constituídos de biomassa florestal residual as propriedades físicas desse produto mostram-se sensíveis a variação da umidade. Assim, a incorporação de micropartículas na formulação desse material deve ser investigada.

3.6. Pisos de Madeira

Acredita-se que a construção civil seja uma das indústrias mais produtivas para o desenvolvimento econômico e social (KARPINSKI et al., 2009). Com isso, a introdução de novos materiais nesse setor provocou avanços tecnológicos relevantes, especialmente na utilização de materiais compósitos. Um desses materiais é o OSB, caracterizado como painel estrutural com propriedades de resistência e rigidez que são semelhantes ao compensado, mas por ser uma opção mais econômica começou a ocupar nichos de mercado antes exclusivos aos compensados, como material de construção, mobiliário, fechamentos, entre outros (JANSSENS, 1998).

Na construção civil, os painéis OSB são utilizados geralmente em aplicações de contrapiso, pisos, fechamentos de parede e telhado. As maiores preocupações para o uso dos painéis como elementos construtivos referem-se à ação das intempéries sobre o material uma vez que recomenda-se o uso do OSB em ambientes secos, uma vez que o contato com a umidade, especialmente nas bordas, pode causar o inchamento substancial dos painéis.

Desde a sua introdução no mercado na década de 1970, o piso de madeira projetada (*engineered wood flooring* - EWF) tem ganho popularidade, especialmente devido a sua aparência (grã natural) e boa estabilidade dimensional (CHEN et al., 2015). Como ilustrado pela Figura 7, o EWF é composto por três partes: uma camada superficial também conhecida como lamela, o adesivo e uma camada de suporte, que representa a maior fração do produto.

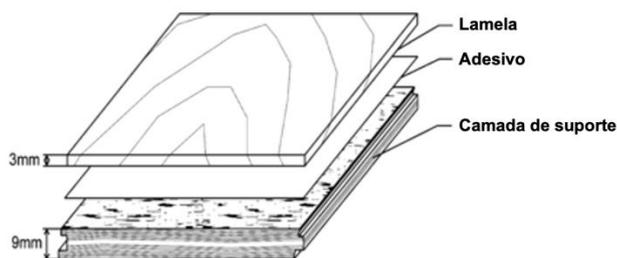


Figura 7 - Seção transversal do piso de madeira projetada modificado

Fonte: Barbuta et al. (2010).

A lamela é a camada estética da face da madeira que fica visível quando instalada, e geralmente é uma peça de madeira de lei serrada. Logo, considerando os recursos naturais limitados e o maior custo da madeira de lei, o EWF é manufacturado com uma fina lamela de espessura igual ou superior a 3 mm. Segundo a literatura, essa espessura (≥ 3 mm) da lamela para os EWF é fixa, pois possibilita o processo de repintura proporcionando um produto com tolerância à abrasão (BARBUTA et al., 2010).

Taylor et al. (2008) afirma que os painéis OSB quando utilizados como base para revestimentos de piso ou contrapiso, se tiverem contato direto com água, podem sofrer inchamento nas bordas dos painéis, formando uma superfície irregular que pode exigir o lixamento de todo o material para alcançar uma superfície plana e uniforme antes da instalação do piso, processo que representa um alto custo na execução de uma construção. Com isso, alguns fabricantes a fim de solucionar o efeito indesejado de inchamento desenvolveram painéis OSB "aprimorados" para uso em piso. Para isso, aumentaram o teor de resina dos painéis tendo como consequência a diminuição do inchamento do material.

Kureli e Dongel (2020) avaliaram o desempenho físico de diferentes estruturas na formação da camada suporte dos EWF sob diferentes condições de umidade relativa e analisaram as taxas de absorção de água, inchamento e retenção de água pelos materiais.

Os resultados mostraram que todos os tipos de pisos de madeira laminada apresentaram boa resistência ao inchamento. Os EWF de madeira laminada com painel de madeira compensada de álamo e os painéis de média densidade tiveram o melhor desempenho quando em ambientes de baixa umidade.

Macedo et al. (2016) analisaram a viabilidade técnica da produção de painéis OSB de madeira de *Pinus sp.* com adição de partículas provenientes de embalagens de polipropileno biorientado (BOPP) em sua matriz constituinte. Os resultados mostraram que apenas as propriedades físicas de inchamento em espessura e absorção de água foram influenciadas pela porcentagem de BOPP. Entretanto, todas as propriedades físicas e mecânicas avaliadas atenderam as recomendações da norma EN 300:2006. Com isso, considera-se plenamente comprovada a viabilidade técnica da produção do painel OSB para possível empregabilidade em setores da construção civil.

Varanda et al. (2018) avaliaram o desempenho físico-mecânico de painéis de partículas homogêneos de alta densidade, com resíduos de madeira de *Pinus elliottii* e casca de aveia (*Avena sativa*) para aplicação em pisos e comparou com três espécies de madeira tropical (Angelim Vermelho, Cumaru e Jatobá). Os resultados obtidos dos painéis aplicados para pisos apresentaram desempenho semelhante as três espécies de madeira, na maioria das propriedades avaliadas, evidenciando a potencialidade dos painéis produzidos para aplicação na indústria de pisos engenheirados.

3.7. Conclusões da Revisão da Literatura

Um dos destinos para aproveitamento dos resíduos de madeira é a confecção de painéis de partículas aglomeradas com resina orgânica e inorgânica. São muitas as variedades de painéis de madeira reconstituída, uma destas são os painéis de partículas orientadas (OSB), que anualmente tem crescido a produção e ocupado espaço no mercado dos painéis compensados. Nesse interim, destaca-se a madeira Balsa.

A madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*) possui como características: baixa densidade (100 kg/m³ a 380 kg/m³), extremamente leve, boa tolerância à luz solar direta e acelerado ritmo de crescimento (18 a 25 m em aproximadamente 7 anos) fato que tem levado essa espécie de madeira a ser utilizada na recomposição de áreas degradadas de florestas naturais.

É relevante salientar que a preocupação com o meio ambiente cresceu muito ao longo do tempo, visando a produção de materiais sustentáveis e que reduzam o impacto ambiental. A utilização da resina PU de mamona é um avanço nas produções de painéis

pois, não emite formol, quando comparado com as resinas comerciais (UF e FF) e possibilita a produção de painéis de partículas com propriedades físicas e mecânicas diferenciadas em relação àqueles produzidos com resinas à base de formol.

O uso de aditivos alternativos, em escala micrométrica tem como objetivo melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas, como a proteção da entrada imediata de água, assim como da biodegradação superficial. O desempenho de um produto é o resultado do equilíbrio dinâmico que se estabelece entre o material e o meio que o circula.

Desse modo, a avaliação das adições de micropartículas e do desempenho de painéis OSB de madeira Balsa residual aplicados como camada de suporte de pisos é necessária para garantir a melhor aceitação como novo material para o mercado da construção civil. A partir deste levantamento ficou evidenciado o ineditismo dessa pesquisa e os resultados poderão contribuir como o campo do conhecimento de maneira incremental.

4. METODOLOGIA

O capítulo a seguir descreve as etapas e métodos que foram utilizados no desenvolvimento do presente estudo.

4.1. Etapas do Projeto

O trabalho foi executado seguindo três etapas. Para descrever as etapas desse estudo, a Figura 8 apresenta um fluxograma de atividades do processo experimental programado e logo abaixo foram apresentadas informações descritivas de cada etapa.

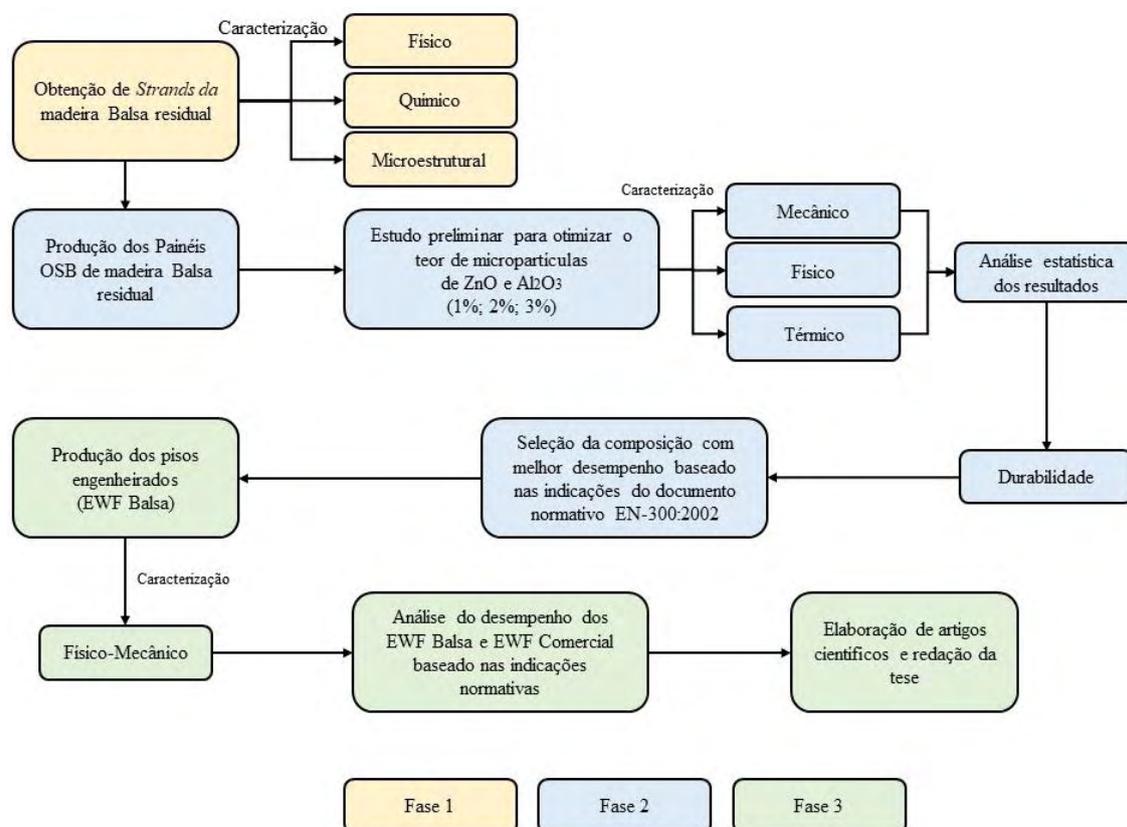


Figura 8 - Fluxograma das rotas experimentais

Fonte: Próprio autor

- Primeira Etapa

Foi analisado a madeira Balsa residual como matéria-prima para potencial uso na produção de painéis OSB por meio de ensaios físico-químicos (densidade aparente, pH, teores de celulose, hemi-celulose e lignina) e microestruturais (MEV);

- Segunda Etapa

Nesta etapa, foi realizado um estudo para o uso das micropartículas sendo avaliado 3 painéis por composição produzida, totalizando a quantia de 21 painéis OSB provenientes de resíduos não aproveitáveis do processamento da madeira Balsa, com resina PU de mamona e micropartículas de ZnO e Al₂O₃ aplicadas em diferentes teores (1%, 2% e 3%). Os teores de micropartículas adotados neste estudo foram superiores em comparação a outros estudos (0,25 - 1%) pelo fato de que a madeira Balsa apresenta baixa densidade, maior porosidade, vasos com diâmetros maiores e com isso consequentemente, requer maior volume de partículas necessário para se atingir a densidade almejada (650 Kg/m³) quando comparado com painéis produzidos com madeiras comerciais de Pinus e Eucalipto.

A Tabela 1 descreve as composições avaliadas para atender as atividades apresentadas no fluxograma da Figura 8.

Tabela 1 - Composições constituintes do estudo das micropartículas

Composição		
Estudo das Micropartículas	Nomenclatura da Composição	Tipo de partícula com respectiva porcentagem
	C-Ref	Sem adição de nanopartículas
	C1-A	Micropartículas de Óxido de alumínio (1%)
	C2-A	Micropartículas de Óxido de Alumínio (2%)
	C3-A	Micropartículas de Óxido de Alumínio (3%)
	C1-Z	Micropartículas de Óxido de Zinco (1%)
	C2-Z	Micropartículas de Óxido de Zinco (2%)
	C3-Z	Micropartículas de Óxido de Zinco (3%)

Fonte: Própria autoria.

Todas essas composições foram caracterizadas antes do envelhecimento por meio de ensaios térmico, físico e mecânico (condutividade térmica, inchamento em espessura, flexão estática 3 pontos, adesão interna), sendo os painéis OSB fabricados com partículas de madeira Balsa residual. Os resultados experimentais obtidos para as propriedades mecânicas e física dos painéis OSB de madeira Balsa residual foram comparadas com os valores estabelecidos pelos documentos normativos EN 300:2002 - Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB) – Definições, classificação e especificações, a fim de selecionar a melhor formulação para ser testada

em um ensaio de envelhecimento acelerado. Após o ensaio, foi analisado a relevância do uso do melhor tratamento com micropartículas para ser adotado na terceira etapa.

- Terceira Etapa

Para a realização da última etapa, foi adotada a metodologia adaptada de Blanchet et al. (2003), sendo produzidos 12 pisos engenheirados com camada de suporte de OSB de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) residual de reflorestamento (EWF Balsa), oriundos do melhor resultado obtido no estudo das micropartículas (2% de micropartículas de Al_2O_3), com lâmina de revestimento de madeira Teca (*Tectona grandis*).

Neste contexto, foi avaliado o desempenho físico e mecânico dos EWF de madeira Balsa e comparados com pisos adquiridos comercialmente (EWF Com) por meio dos testes de delaminação em água fria, resistência ao esforço rolante, dureza Janka, abrasão, cisalhamento em bloco e variação dimensional, com o intuito de validar a aplicação dos EWF Balsa em diversos setores da construção civil com uso em pisos. A Figura 9 apresenta um fluxograma desta etapa de produção e caracterização.

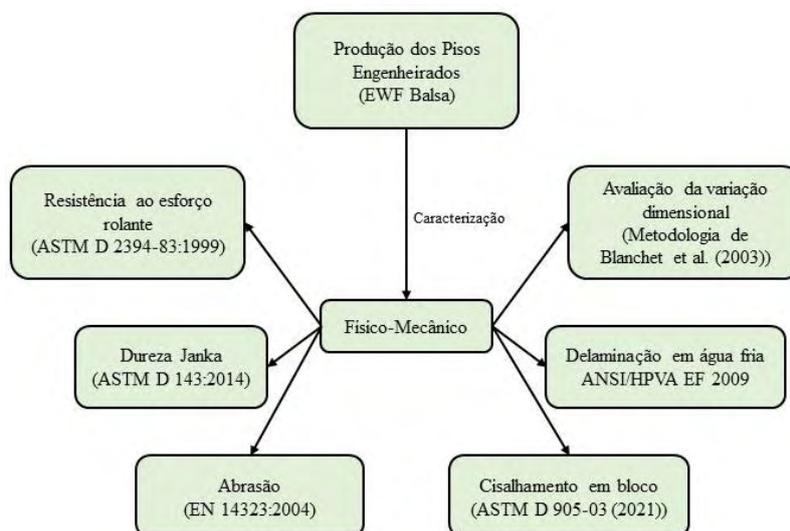


Figura 9 - Fluxograma das caracterizações dos EWF Balsa

Fonte: Próprio autor

4.2. Materiais

Para o desenvolvimento dos painéis OSB e dos EWF foi utilizado resíduo de madeira Balsa de reflorestamento (SisGen A4206B8) resultantes do processamento industrial de uma empresa, situada no interior do estado de São Paulo, que comercializa madeira Balsa serrada. A madeira residual coletada (Figura 10) para pesquisa era composta por partes rejeitadas do processamento industrial da tora devido a defeitos relacionados ao formato, densidade fora das especificações comerciais ou rachaduras.



Figura 10 - Madeira Balsa residual
Fonte: Próprio autor

A resina PU de mamona é do tipo bicomponente de cura a frio, composta pelo polioliol B1640 e pelo pré-polímero A249 da empresa IMPERVEG Poliuretano Vegetal, com viscosidade média de 167 cPs formulada pela mistura a frio de um pré-polímero (componente A) com 99,92 % de teor de sólidos e um polioliol (componente B) com 99,91% de teor de sólidos (praticamente isento de solventes). As micropartículas de Al_2O_3 (Óxido de Alumínio P.A, CAS 1344-28-1, Código P.10.0795.000.00.27 e Lote 107492) e ZnO (Óxido de Zinco P.A. - ACS, CAS 1314-13-2, Código P.10.0795.072.00.27 e Lote 111138) foram obtidas da empresa Dinâmica Química Contemporânea LTDA. Tanto a resina quanto as micropartículas foram adquiridas

comercialmente e as informações técnicas listadas foram cedidas segundo certificado de análise das respectivas empresas que forneceram os materiais.

As lâminas de madeira Teca (*Tectona grandis*) com 3 mm de espessura para a produção dos EWF Balsa e os EWF Com foram obtidas comercialmente (Figura 11).



Figura 11 - Lâmina de madeira Teca (*Tectona grandis*) e EWF Comerciais
Fonte: Próprio autor

4.3. Métodos

Esse item relata a metodologia empregada nas três etapas da pesquisa. A primeira, que consistiu na caracterização físico-química e microestrutural das partículas de madeira Balsa. Na segunda etapa, a caracterização termo-físico-mecânica dos painéis OSB de madeira Balsa aglomerados com resina PU de mamona e micropartículas de ZnO e Al₂O₃ incorporadas antes do envelhecimento, e após o envelhecimento, o melhor tratamento com micropartículas foi caracterizado por um ensaio físico e mecânico. Já na terceira etapa, foi desenvolvido e avaliado o desempenho de um piso engenheirado (EWF) de madeira Balsa residual e comparado com um EWF comercial por meio de testes físico-mecânicos para validar sua aplicação em diversos setores da construção civil com uso em pisos.

4.3.1. Primeira Etapa – Preparação e Avaliação do Potencial da Madeira Balsa

4.3.1.1. Obtenção e Preparação dos Strands de Madeira Balsa

O resíduo de madeira Balsa foi cortado em blocos com dimensões aproximadas de 9 cm x 5cm (dimensões máximas do bocal de abastecimento do moinho de disco) para garantir a produção de *strands* na direção longitudinal. Logo após, os blocos foram processados em moinho de disco com acionamento por motor elétrico, marca Marconi. As lascas foram geradas com 9 cm de comprimento, 2,5 cm de largura e 0,1 cm de

espessura (BARBIRATO et al., 2018; CAMPOS FILHO et al., 2023), sendo a espessura maior que a indicada na literatura (0,05 - 0,075 cm) devido as características da espécie de madeira estudada e seu teor de celulose elevado (Figura 12a).

Na sequência, as partículas (strands) de madeira geradas foram peneiradas a fim de eliminar finos e impurezas (Figura 12b) e, em seguida, foram levadas para o processo de secagem uma estufa com temperatura de 65°C (Figura 12c), por 48 horas, para se obter um material com 8% de umidade (LOPES JUNIOR et al., 2023).



Figura 12 - Processo de obtenção de *strands* de madeira Balsa. (a) Moinho de discos. (b) Preparação das lascas para serem inseridas na estufa. (c) Estufa utilizada para o processo de secagem.

Fonte: Próprio autor

As partículas foram caracterizadas por meio de ensaios químicos (composição química e pH), ensaios físicos (densidade aparente) e ensaios microestruturais (Microscopia eletrônica de varredura – MEV).

4.3.1.2. Composição Química

Para definir a composição química das partículas da biomassa florestal residual de madeira Balsa foi utilizada a metodologia descrita por Silva e Queiroz (2002) que possibilita quantificar os teores de celulose, hemicelulose e lignina do material e compará-los com os de madeira Eucalipto e Pinus comercialmente utilizada na produção de painéis OSB, a fim de verificar o potencial desse material como constituintes de painéis OSB. As amostras retiradas da queima da madeira Balsa foram utilizadas para realizar a análise bromatológica a fim de estimar os valores de celulose, hemicelulose e lignina do material.

Esse processo consiste em separar os conteúdos celulares da parede celular por meio do aquecimento da amostra numa solução de detergente neutro. Basicamente, o conteúdo celular se solubiliza no detergente, enquanto a parede celular não permite a separação por filtração. A fibra é então aquecida em detergente ácido, o que permite solubilizar a celulose e hemicelulose, que pode então ser separada da lignina ligada à celulose (lignocelulose) por filtração (SALMAN et al., 2010).

4.3.1.3. pH

Para determinação do pH foi realizada uma modificação na metodologia descrita por Vital (1973), que consistiu em secar em estufa a (103 ± 2) °C, lascas de madeira Balsa até atingir peso constante. Em seguida, 20g do material foram imersos em água ionizada por três horas, à temperatura de 22°C. Posteriormente, por meio de um pHmetro digital da marca DIGIMED modelo DM-23, até ele se estabilizar, foi determinado o pH dessa água. Esse ensaio foi necessário, pois as madeiras que possuem baixo pH (<3), ou seja, em ambiente ácido geralmente apresentam dificuldade de aglomeração em decorrência da cura da resina.

4.3.1.4. Densidade Aparente

Para determinação da densidade aparente da madeira foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos com seção transversal retangular, de acordo com a norma NBR7190 – Projetos de estruturas de madeira. Para encontrar o volume foram aferidas 3 medições para comprimento, largura e altura, e através da equação (1) foi calculada a densidade aparente.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ = densidade aparente (Kg/m³);

m = massa da amostra de madeira (Kg);

v = volume da amostra de madeira (m³)

4.3.1.5. Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

Com objetivo de avaliar a anatomia dos poros e espessura da parede fibrilar dos *strands*, as amostras de partículas de madeira Balsa foram analisadas por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de baixo vácuo, modelo TM-3000 marca Hitachi, acoplado com sistema de microanálise de raios X por espectroscopia de energia dispersivo, sem a necessidade de fazer o recobrimento metálico. As dimensões das amostras possuíam uma medida de 25 x 25 mm, e foram geradas imagens com aumentos da ordem de 50x, 200x, 500x e 1000x, sendo capaz de indicar a anatomia dos poros e espessura da parede fibrilar da madeira Balsa.

Segundo Barbirato et al. (2018), essas informações são importantes para verificar a potencialidade da matéria-prima na produção de painéis de partículas, permitindo ainda a comparação com madeiras utilizadas comercialmente como Pinus e Eucalipto.

4.3.2. Segunda etapa – Estudo para Otimizar o Teor de Micropartículas na Produção de Painéis OSB

Para o estudo da incorporação de micropartículas foram produzidos, em laboratório, 21 painéis OSB de madeira Balsa residual, sendo 3 painéis para cada composição analisada no estudo, com 13% de resina PU de mamona de média densidade (650 kg/m^3), dimensões de 400 x 400 mm, espessura de 10 mm e adicionados diferentes teores de micropartículas de Al_2O_3 e ZnO (1%, 2% e 3%), além de uma composição sem a adição de micropartículas agregadas.

4.3.2.1. Produção dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual

Após a preparação da matéria-prima (*strands* de madeira Balsa) foi possível elaborar os cálculos a fim de estimar a quantidade de massa necessária para produzir os painéis com densidade 650 kg/m^3 , segundo as diretrizes de Lopes Junior et al. (2021). Para determinar o volume do material produzido foi necessário levar em consideração a dimensão do colchão formador do painel (400 x 400 mm) e a espessura adotada no painel (10 mm). Fixada a quantidade de massa necessária para cada painel, às partículas foram pesadas utilizando uma balança eletrônica (AY220) e distribuídas em recipientes de 35 litros para serem destinadas a uma betoneira onde será feita a inclusão do adesivo.

Na sequência, para fabricação dos painéis foram misturadas as micropartículas de ZnO e Al_2O_3 com os teores adotados em 1, 2 e 3% ao adesivo PU de mamona (em uma

proporção de 1 pré-polímero (isocianato): 1,5 polioliol), em seguida, a mistura (adesivo + partículas) foi aplicada nas lascas com 90 mm de comprimento, 25 mm de largura e 1 mm de espessura, pelo método de aspersão, com o propósito de inserir a mistura sem danificar ou comprometer as estruturas das lascas de madeira Balsa.

Posteriormente, o material foi inserido em um molde orientador de painel com dimensão de 400 x 400 mm, sendo que a cada camada inserida, foi realizada a mudança de direção do orientador com o objetivo de direcionar as partículas (face perpendicular com o miolo) até formar 3 camadas levando em consideração a proporção face-miolo-face de massa igual a 30:40:30, mais utilizada industrialmente. Vale ressaltar que para evitar possível aderência entre as partículas com as chapas da prensa, as chapas de aço da prensa termo-hidráulica foram revestidas com manta teflon.

Posteriormente, o material (mistura de *strands* com resinas) foi transferido para a prensa termo-hidráulica (pressão 50 kgf/cm², temperatura de 110°C quando usado resina PU de mamona e tempo de prensagem de 10 minutos), seguindo as recomendações detalhadas por Maloney (1996). Com o fim do processo de prensagem, os painéis foram armazenados a temperatura ambiente por 72 h, período requerido para a continuação do processo de cura da resina. Após as 72 horas de cura, os painéis foram refilados em dimensões finais (400 mm x 400 mm) dos quais foram extraídos corpos de prova para a condução dos ensaios de caracterização do material.

Assim, foram fabricados painéis de média densidade (650 kg/m³) com resina PU de mamona e micropartículas de ZnO e Al₂O₃ incorporadas em diferentes teores (1%, 2% e 3%) em massa de partículas, com espessura de 10 mm, conforme as composições apresentadas na Tabela 1, totalizando a produção de 21 painéis. A Figura 13 apresenta um fluxograma que resume todo o processo de produção dos painéis OSB de madeira Balsa residual com micropartículas incorporadas.

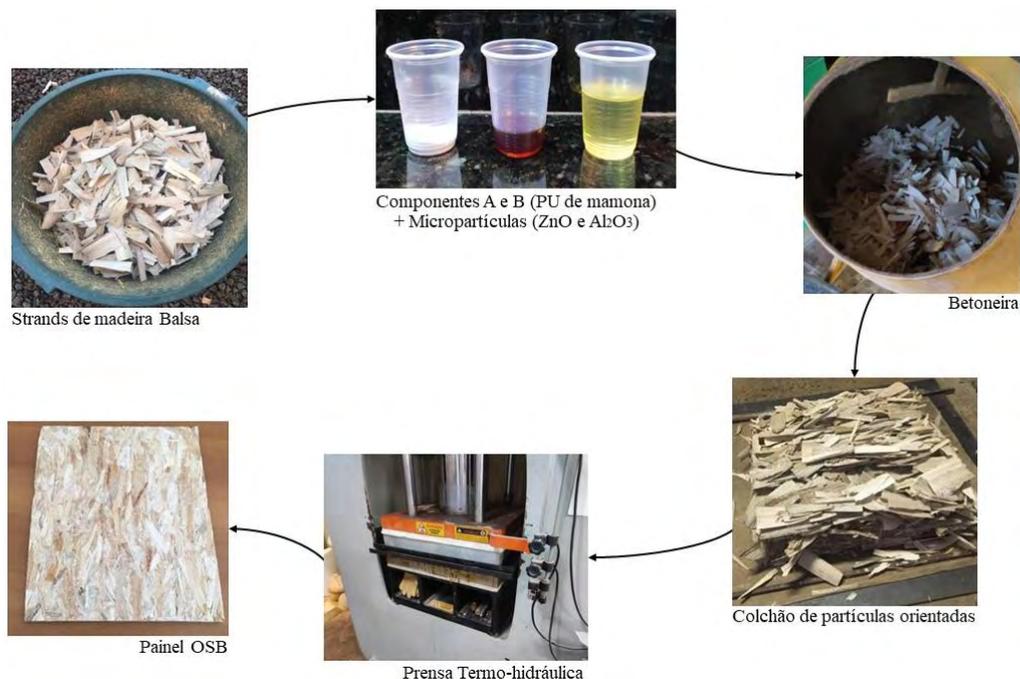


Figura 13 - Etapa de produção dos painéis OSB.
Fonte: Próprio autor

4.3.2.2. Caracterização dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual

Os painéis foram caracterizados por meio de ensaios mecânicos (flexão estática, tração perpendicular e arrancamento de parafuso face e topo), físico (inchamento em espessura (24 h)), térmico (condutividade térmica) e microestrutural (MEV), sendo este último não destrutivo, a fim de verificar a qualidade dos materiais frente às diferentes possibilidades de uso para o desenvolvimento do piso.

A fim de descrever as propriedades mecânicas dos painéis, o ensaio de flexão estática foi necessário, pois é possível determinar os valores de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Já, pelo ensaio de tração perpendicular, foi avaliada a adesão interna das partículas. Por outro lado, a propriedade física dos painéis foi definida pelo ensaio de inchamento em espessura (IE) para conferir o grau de compactação das partículas ao longo da espessura.

Os painéis de madeira Balsa foram caracterizados e comparados com as indicações de classes estabelecidas por meio de ensaios mecânicos e físicos seguindo as especificações da norma EN300:2002 – *Oriented Strand Boards (OSB) - Definitions, classification and specifications* e suas normas derivadas, relacionadas a cada ensaio específico.

A caracterização microestrutural dos painéis referentes às composições será efetuada pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), possibilitando estudar a interface resina-partícula, bem como defeitos intrínsecos ao processo de produção dos painéis. Já a caracterização térmica foi realizada pelo ensaio de condutividade térmica com o intuito de analisar a capacidade do material em conduzir energia térmica.

4.3.2.2.1. Caracterização física

Para a caracterização física dos painéis foram realizados ensaios de inchamento em espessura, de acordo com a norma EN300:2002.

4.3.2.2.2. Inchamento em Espessura 24 horas

Para realização do ensaio de inchamento em espessura, um total de 10 amostras de cada composição foram avaliados sendo imersos em água destilada por 24 horas. Após esse período, os corpos de prova com formato quadrado de aproximadamente (50 ± 1) mm de aresta foram retirados da água, de acordo com o documento normativo EN 317:1993. Em seguida, com um paquímetro da marca Mitutoyo foram efetuadas as medidas de espessuras dos corpos de prova antes e após a sua imersão em água limpa, com pH igual a 7 e temperatura de 20 ± 1 °C. Além do mais, estes devem permanecer cobertos por (25 ± 5) mm de água durante 24 horas.

O inchamento em espessura é dado em percentagem, sendo calculado por meio da Equação (2) apresentada a seguir.

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} * 100 \quad (2)$$

Onde:

G_t = inchamento em espessura 24h (%);

t_1 = espessura inicial (mm);

t_2 = espessura final após 24h (mm)

4.3.2.2.3. Caracterização Mecânica

Para a caracterização mecânica dos painéis foram realizados ensaios de flexão estática e tração perpendicular, de acordo com a norma EN319:1993 e EN 310:2000.

Estes ensaios foram realizados em máquina universal de ensaio da marca EMIC, com capacidade de 30 t e em máquina universal de ensaio servo-hidráulica da marca MTS, com capacidade de 1 t, ambas dotadas de sistema computadorizado para controle das variáveis de ensaio e coleta dos dados.

4.3.2.2.4. Flexão Estática

Para a realização do ensaio de flexão estática para determinação do MOE e MOR foram extraídos dos painéis corpos de prova com geometria retangular e largura de 50 ± 1 mm, seguindo as prescrições do documento normativo EN 310:2000. Além do mais, o documento exige que o comprimento dos corpos de prova deve ser igual a 20 vezes a espessura nominal com um acréscimo de 50 mm, dentro de um intervalo onde o comprimento máximo é 1050 mm e o mínimo 150 mm. A espessura foi extraída do ponto de encontro das diagonais e a largura, na metade do comprimento.

Para a amostragem e o corte dos corpos de prova foram adotadas as diretrizes do documento normativo EN 326-1:1994, como se trata de OSB foi necessário obter corpos de prova nas duas direções, longitudinal e transversal. Com isso, os ensaios foram realizados em dois grupos de corpos de prova retirados segundo as duas direções da placa, isto é, segundo a direção longitudinal e a transversal.

Os corpos de prova foram aclimatados até ficarem com massa constante a uma temperatura de (20 ± 2) °C e umidade relativa de (65 ± 5) %. A massa é definida como constante quando duas pesagens sucessivas, efetuadas em um intervalo máximo de 24 horas, não apresentam resultados que variam em mais de 0,1% com relação à massa do corpo de prova.

De acordo com a metodologia da norma EN 310:2000, foram utilizados 10 corpos de prova nas dimensões de 250 x 50 mm, colocados sobre dois apoios da máquina universal de ensaios, onde o comprimento do vão foi 20 vezes a espessura da placa, sem que ela seja inferior a 100 mm e superior a 1000 mm e mede-se a distância entre os centros de apoio, com a aproximação de 0,5 mm.

Posteriormente, a máquina universal foi calibrada com uma sensibilidade de 0,1 mm com uma precisão de 1% do valor medido para realização do ensaio de flexão

estática a 3 pontos. Para o ensaio, os corpos de prova foram colocados sobre os apoios na posição horizontal e o seu eixo longitudinal ficou perpendicular aos eixos dos apoios com o ponto central sobre a força. A velocidade do ensaio foi constante e regulada para que a força de ruptura fosse atingida em (60 ± 30) s.

Com isso, foram determinados valores de Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de elasticidade (MOE), conforme as Equações (3) e (4).

$$MOR = 1,5 * \frac{(P * D)}{B * (E^2)} \quad (3)$$

Onde:

MOR - Módulo de ruptura (MPa);

P - carga de ruptura (N);

D - distância entre apoios do aparelho (mm);

B - largura do corpo de prova (mm);

E - espessura média tomada em três pontos do corpo de prova (mm).

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

Onde:

MOE - Módulo de elasticidade (MPa);

P1 - carga no limite proporcional (N);

D - distância entre apoios do aparelho (mm);

d - deflexão correspondente à carga P1 (N);

B - largura do corpo de prova (mm);

E - espessura média referente a três pontos do corpo de prova (mm);

A norma EN 300:2002 é de exclusividade para produtos OSB derivados de madeira e o Anexo 1 apresenta as Tabelas da Norma EN 300/2002 - Definições, classificação e especificações que dividem os painéis em 4 classes de uso e indicam recomendações mínimas de propriedades físico-mecânicas para painéis OSB.

4.3.2.2.5. Tração Perpendicular

O ensaio de tração perpendicular visa determinar a adesão interna das partículas e foi realizado seguindo as recomendações da norma EN319-2006. Foram avaliados 10 corpos de prova de formato quadrado com (50 ± 1) mm. Essas amostras foram fixadas em suportes metálicos e posicionados no dispositivo para ensaio de tração perpendicular na máquina universal de ensaios EMIC e submetidos a esforços de tração em direções opostas, a uma velocidade de 4 mm/min.

Após a realização do ensaio, foi determinado o valor da adesão interna (AI) das partículas visando identificar a eficiência e quantidade do adesivo de acordo com a equação 5.

$$AI = \frac{F_{m\acute{a}x}}{S} \quad (5)$$

Onde:

AI = adesão interna (MPa);

$F_{m\acute{a}x}$ = força máxima (N);

a = comprimento do corpo de prova (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

Sendo a área de adesão $S = a \times b$.

4.3.2.2.6. Caracterização Térmica

Para a caracterização térmica dos painéis foram realizados ensaios de condutividade térmica de acordo com a norma ASTM E1530-11:2014 – *Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique*.

4.3.2.2.7. Condutividade Térmica

Para esse ensaio foi utilizado o equipamento Thermal Conductivity Tester DTC-300 da Marca Discovery, que opera com medidores de fluxo de calor e em estado estacionário com fluxo de calor descendente.

Os corpos de prova extraídos dos painéis OSB de madeira Balsa residual com micropartículas incorporadas (Al_2O_3 e ZnO) tiveram suas faces impregnadas com pasta térmica com o objetivo diminuir a resistência térmica da superfície entre o CPs e os pratos do equipamento. Para garantir o fluxo de calor, a diferença de temperatura foi de

30°C entre os pratos, em que nos pratos superior e inferior as temperaturas setadas foram de 45°C e 15°C, respectivamente. Já a força de compressão utilizada entre os pratos e os CPs foi de aproximadamente 0,30 MPa. Ao todo, foram utilizados 3cps com diâmetro de 50 mm para cada tratamento, seguindo as recomendações da norma ASTM E1530-11:2014. Por outro lado, os resultados obtidos foram comparados com a norma NBR 15220:2003 – Desempenho térmico de edificações parte 1: Definições, símbolos e unidades.

4.3.2.3. Análise Estatística das Propriedades Física e Mecânicas e Seleção do Teor de Micropartículas

Como exposto, além da condição de referência (painéis fabricados sem a inclusão dos óxidos), foram fabricados painéis com base em seis composições experimentais, diferenciados pelos tipos de óxidos (Alumínio ou zinco) e pelos teores dos mesmos (1, 2 e 3%), cabendo destacar que foram fabricados 3 painéis por composição, o que resultou em 21 painéis ao todo, na etapa de estudo das micropartículas.

Após a análise descritiva, os dados foram submetidos a uma análise inferencial para diagnosticar a existência de diferença significativa entre as composições estudadas para cada micropartícula. Foi realizado o teste de contraste de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância e com o auxílio do software Minitab® versão 18, utilizado para avaliar a influência dos tipos de ZnO e Al₂O₃ assim como dos teores (1, 2 e 3%) desses em propriedades físicas e mecânicas, vide apêndice 1. Na Tabela 2 são apresentados o número de repetições consideradas na obtenção das propriedades e para cada composição (Comp.) delineada, o que resultou em 482 determinações experimentais.

Tabela 2 - Amostras por composição e por tipo de ensaio experimental.

Comp.	Flexão Estática				AI	Cond.	IE
	MOR-L	MOE-L	MOR-T	MOE-T	TP	Λ	24h
Ref.	7	7	7	7	10	3	5
1% de ZnO	7	7	7	7	10	3	5
2% de ZnO	7	7	7	7	10	3	10
3% de ZnO	7	7	7	7	10	3	10
1% de Al ₂ O ₃	7	7	7	7	10	3	5
2% de Al ₂ O ₃	7	7	7	7	10	3	10
3% de Al ₂ O ₃	7	7	7	7	10	3	10

Fonte: Próprio autor.

Do teste de Tukey, A denota a composição associada ao maior valor médio de uma certa propriedade, B a composição relacionada ao segundo maior valor médio e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em composições distintas com médias estatisticamente equivalentes (ao nível de 5% de significância). O teste de Anderson-Darling, também o nível de 5% de significância, foi utilizado para avaliar a normalidade nas distribuições das propriedades. Valor-p do teste maior ou igual ao nível de significância implica em aceitar a normalidade na distribuição, o que valida os resultados obtidos do teste de Tukey assim como dos intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade). A transformada de Johnson (escalas variadas) foi utilizada para distribuições consideradas não normais pelo teste de Anderson-Darling.

Com o fim da análise do estudo das micropartículas, foi possível definir a melhor composição das micropartículas de ZnO e Al₂O₃ visando a aplicação desse material na indústria da construção civil frente às diferentes possibilidades de uso para o desenvolvimento do piso.

4.3.2.4. Estudo da durabilidade dos Painéis OSB

Com a seleção da melhor composição das micropartículas incorporadas nos painéis OSB (2% de micropartículas de Al₂O₃) foi proposto o estudo da durabilidade dos painéis OSB de madeira Balsa residual de reflorestamento com objetivo de simular a longo prazo o efeito das micropartículas sob as condições de exposição desses painéis a variação da umidade, temperatura e radiação UVB.

Para a realização do ensaio de intemperismo artificial (Figura 14), o procedimento foi adaptado da norma APA PRP 108:1994 - Standard Accelerating Tests. Os CPs foram inseridos em câmara de intemperismo artificial UV (modelo EQUV – EQUILAN), submetidas a 8 ciclos de 12 h (8 h de radiação UVB com 0,49 de irradiância a 60°C e 4 h de condensação a 50°C).



Figura 14 - Amostras de painel OSB de madeira Balsa residual de reflorestamento em câmara de intemperismo artificial

Fonte: Próprio autor.

4.3.3. Terceira etapa - Desenvolvimento e Análise de Desempenho de um Piso Engenheirado (EWF Balsa)

4.3.3.1. Produção dos EWF Balsa

Os EWF Balsa foram produzidos com a geometria ilustrada na Figura 7 (camada suporte, adesivo e lamela) e para sua construção foram necessárias a realização de duas fases. Na primeira, foi produzida a camada de suporte do EWF com os painéis OSB de madeira Balsa residual que apresentaram a composição de melhor desempenho na segunda etapa deste estudo (composição com 2% de micropartículas de Al_2O_3). O uso das micropartículas metálicas nos painéis OSB, assim como nos resultados apresentados na segunda etapa do estudo, se justifica uma vez que a sua incorporação contribui com o gradiente de temperatura durante o processo de prensagem, maximizando a cura da resina, refletindo em melhores propriedades físicas e mecânicas. O processo de produção dos painéis OSB de madeira Balsa residual foi realizado da mesma forma que o item 4.3.2.1., dessa vez confeccionados com 12 mm de espessura e dimensões (500 x 500 mm).

Posteriormente, para segunda fase, na montagem dos EWF Balsa foi adotada a metodologia adaptada de Blanchet et al. (2003) e as recomendações do fabricante dos EWF comerciais. Para as lamelas, foi utilizado um revestimento comercial de madeira teca (*Tectona grandis*) com 3 mm de espessura. Já o adesivo utilizado foi a resina PU de Mamona, na proporção de 3% da massa do painel OSB, responsável por colar a lâmina de madeira Teca sobre a camada de suporte de OSB de madeira Balsa residual. Durante

o processo de produção do EWF Balsa, o conjunto (painel OSB, Resina PU de mamona e Lâmina de madeira Teca) foi levado para prensa termo hidráulica, com pressão 3 MPa, temperatura 120°C e tempo de prensagem 15 min., gerando os EWF Balsa. A Figura 15 apresenta um fluxograma que resume todo o processo de produção dos EWF Balsa.



Figura 15 - Etapa de produção dos EWF Balsa.
Fonte: Próprio autor

Uma vez curados, os pisos foram refilados em dimensões finais (500 x 500 mm) e extraídos corpos de prova para a condução dos ensaios de caracterização do material. Nesta etapa, foram produzidos aproximadamente 12 pisos.

4.3.3.2. Caracterização dos Pisos Engenheirados (EWF Balsa e EWF Com)

Os EWF Balsa e os comerciais foram caracterizados com base nas indicações de classes estabelecidos por meio de ensaios físico-mecânicos e comparados com o EWF comercial a fim de verificar o potencial do EWF Balsa frente às diferentes possibilidades de uso para piso na construção civil.

Dentre os ensaios encontram-se aqueles que simulam situações do dia-a-dia que o EWF enfrentará, como a resistência ao esforço rolante, descrito por suas características para determinar os danos causados ao EWF pela repetição de esforço rolante, reproduzindo aqueles gerados por cargas pesadas, como pianos, camas, cadeiras, aparelhos domésticos, entre outros; dureza Janka que é realizado para determinação da

dureza do material; ensaio de abrasão descrito por determinar a resistência quanto às classes de abrasão e classifica os EWF quanto ao nível de uso e desgaste do material; e cisalhamento em bloco usado para mensurar as propriedades de adesão entre a camada suporte do OSB e a lamela. Além destes ensaios, temos o ensaio delaminação em água fria e avaliação da variação dimensional que visam simular o stress que o EWF sofrerá a longo prazo.

A tabela 3 ilustra as normas estabelecidas seguindo as diretrizes bibliográficas para os ensaios que foram realizados nos EWF de Balsa e EWF Com a fim de atender as indicações das classes para piso de madeira.

Tabela 3 - Normas estabelecidas das classes para piso de madeira

	Ensaio	Diretriz bibliográfica	Dimensões (mm)
Físico	Delaminação em Água Fria (DAF)	ANSI/HPVA EF 2009 - American National Standard For Engineered Wood Flooring	50,8 x 127
	Resistência ao Esforço Rolante (RER)	ASTM D 2394-83 (1999) - Standard Methods for Simulated Service Testing of Wood and Wood-Base Finish	120 x 240
	Dureza Janka (H)	Flooring e Padilha et al. (2006) ASTM D143 (2014) - Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber	150 x 75
Mecânico	Abrasão (Abr)	EN 14323 (2004) - Wood-based panels: Melamine faced boards for interior uses - test methods	100 x 100
	Cisalhamento em Bloco (CB)	ASTM D 905-03 (2021) - Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading	50,8 x 50,8
	Variação Dimensional do Piso (VD)	Metodologia Adaptada de Blanchet et al. (2003) - Comparative study of four adhesives used as binder in engineered wood parquet flooring	80 x 50

Fonte: Próprio autor

4.3.3.3. Ensaio Físico

4.3.3.4. Delaminação em Água Fria

O ensaio de delaminação (DAF) do piso será realizado de acordo com a normativa ANSI/HPVA EF 2009 com objetivo de avaliar a delaminação do OSB bem como da junção entre o OSB e lamela. Ao todo 12 amostras do EWF Balsa e EWF Com foram preparadas nas dimensões de 50,8 mm x 127 mm na direção da grã. O teste foi conduzido por meio de ciclos de umedecimento e secagem, inicialmente as amostras foram inseridas em água (24°C) durante 4 h, seguido pela secagem em estufa com circulação de ar (50°C) por 19 h (Figura 16a). Este procedimento foi realizado até a conclusão de 3 ciclos ou até atingir a falha da amostra (50,8 mm de comprimento, 0,08 mm de largura e 6,4 mm profundidade – ANSI HPVA EF, 2009). A cada ciclo, as delaminações dos corpos de prova foram mensuradas (Figura 16b) e os que atingiam pelo menos um desses valores de falha eram descartados antes da finalização dos 3 ciclos.



Figura 16 - Ensaio de Delaminação em água fria. (a) Secagem em estufa. (b) CP no momento da aferição das delaminações.

Fonte: Próprio autor

4.3.3.5. Ensaio Mecânicos

4.3.3.6. Resistência ao Esforço Rolante (RER)

Seguindo as recomendações da norma ASTM D 2394-83:1999 e os parâmetros adotados por Padilha et al. (2006), o ensaio consiste em medir a resistência do EWF através do movimento uniforme de uma carga total de 890 N sobre uma roda (Figura 17). Para isso, foram necessários um conjunto de 14 CPs com dimensões de 240 mm x 120 mm para o EWF Balsa e EWF Com 240mm simulando a área de um piso a fim de

medir a profundidade ou depressão (D) deixada sobre esta roda. A profundidade produzida por repetidas voltas é o índice de resistência dos EWF, num sistema de vai-e-vem totalizando 50 voltas, sendo considerado uma volta como uma única passagem da roda sobre o corpo-de-prova. A profundidade será medida com um micrômetro na 10^a, 25^a e 50^a viagens.



Figura 17 - Ensaio de Resistência ao Esforço Rolante.

Fonte: Próprio autor

4.3.3.7. Dureza Janka

O ensaio de dureza Janka (H) foi realizado seguindo as recomendações da norma ASTM D 143:2014. Foram necessários 11 CPs nas dimensões 150 x 75 mm para o EWF Balsa e EWF Com. Os CPs foram posicionados em máquina universal de ensaio (EMIC) e avaliados até o limite de penetração da metade do diâmetro de 11,3 mm de uma esfera (Figura 18a), sendo aferida duas leituras por CP (Figura 18b).



Figura 18 – Ensaio de Dureza Janka. (a) CP posicionado na máquina universal de ensaio (EMIC). (b) CP após realização do ensaio.

Fonte: Próprio autor

4.3.3.8. Abrasão

Para o ensaio de abrasão (ABr) foram selecionados, três CPs com dimensões de 100 mm x 100 mm do EWF Balsa e EWF Com, obedecendo aos preceitos da norma EN 14323:2004. Os CPs foram pesados e medidos com micrômetro a cada 300 ciclos, totalizando 3600 ciclos, quantidade indicada para piso do tipo AC3 (uso doméstico alto e uso comercial baixo), sendo aferida a perda de espessura e de massa dos EWF. Nesse ensaio foram utilizados micrômetro, uma balança de precisão de marca Shimadzu AY-220 e o equipamento de ensaio TABER (Figura 19).



Figura 19 – Ensaio de Abrasão.

Fonte: Próprio autor

4.3.3.9. Cisalhamento em Bloco

Para o ensaio de cisalhamento (Cis-BI), foram utilizadas as diretrizes da normativa ASTM D 905-03 (2021) (Figura 20a) com o objetivo avaliar a adesão entre a camada de suporte e a lâmina de madeira (Figura 20b), sendo determinada a resistência ao cisalhamento dos EWF. Neste teste, foram utilizadas 10 amostras dos EWF Com e EWF Balsa com dimensões de 50,8 mm x 50,8 mm que foram montadas entre dois blocos com um adesivo (PU de mamona). Os blocos de cisalhamento foram fabricados de forma que a carga aplicada seja paralela à fibra da madeira.

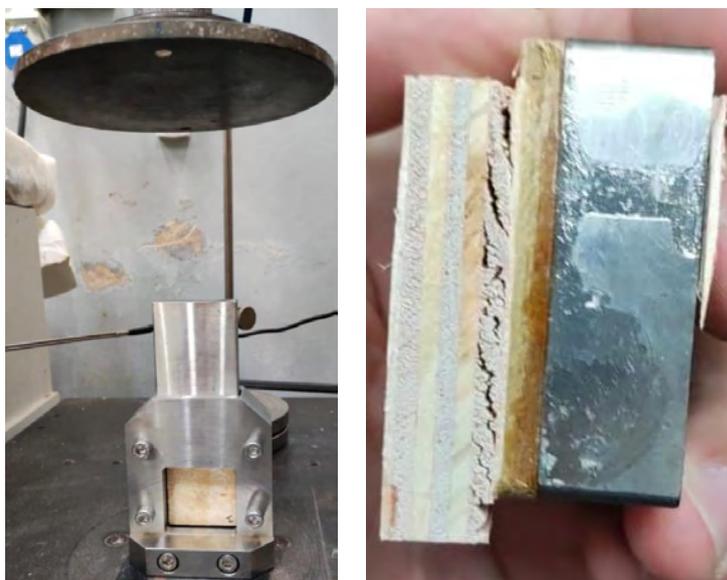


Figura 20 - Ensaio de Cisalhamento em bloco. (a) CP posicionado na máquina universal de ensaio (EMIC). (b) CP após realização do ensaio.

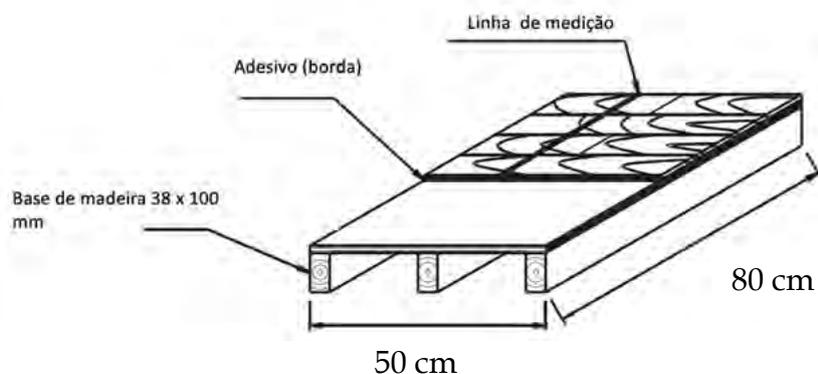
Fonte: Próprio autor

4.3.3.10. Variação Dimensional do Piso

A avaliação da variação dimensional (VD) dos EWF Balsa e EWF Com foi realizada de acordo com a metodologia de Blanchet et al. (2003) com algumas modificações. Para realizar o teste, um aparato simulando a montagem de um piso do sistema construtivo *wood-frame* foi fabricado. O aparato onde os EWF foram instalados tinha as seguintes dimensões: 80 x 50 cm, fabricados com vigas de madeira Balsa contendo 3.8 x 10.0 cm cada (Figura 21a).

As amostras foram submetidas a condições secas (inverno – 20 °C e 40 % UR) e úmidas (verão – 30 °C e 60 % de UR). Os EWF foram submetidos a três ciclos: úmido, seco, úmido, sendo cada ciclo com duração de 15 dias de condicionamento. As

medições foram realizadas ao longo de uma linha localizada a um terço do comprimento da borda do piso utilizando um relógio comparador. A aferição da variação dimensional foi realizada por meio de um relógio comparador ao longo de uma linha localizada a um terço da borda do EWF (Figura 21b).



(a)



(b)

Figura 21 – Teste de variação dimensional. (a) Aparato para avaliação da variação dimensional do EWF. (b) Aferição do EWF.

Fonte: Adaptado de Blanchet et al. (2003).

4.3.3.11. Análise de Desempenho dos EWF Balsa e EWF Com

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos EWF Balsa foram comparados com EWF Com por meio de estatística descritiva, assim como foi realizado no item 4.3.2.3 - Análise Estatística das Propriedades Físicas e Mecânicas e Seleção do Teor de Micropartículas, da segunda etapa da presente pesquisa. A Tabela 4 apresenta a quantidade de amostras para cada EWF.

Tabela 4 - Quantidade de amostras por composição e por tipo de ensaio dos EWF.

EWF	Ensaio					
	DAF	H	ABr	Cis-BI	VD	RER
Balsa	12	22	3	10	3	14
Comercial	12	22	3	10	3	14

Fonte: Próprio autor

Com base na análise estatística foi possível avaliar a qualidade do EWF Balsa frente às diferentes possibilidades de uso para piso de madeira na construção civil, com base nas indicações estabelecidas nas normas ASTM D 2394-83:1999, ASTM D 143:2014, ABNT NBR 8404:1984 e EN 14323:2004, ASTM D 905-03 (2021), ANSI/HPVA EF 2009 e Metodologia de Blanchet et al. (2003).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos próximos itens foram apresentados e discutidos todos os resultados obtidos da caracterização da madeira Balsa (primeira etapa); dos ensaios físicos-mecânicos dos painéis OSB de madeira Balsa residual a fim de definir a melhor composição das micropartículas ZnO e Al₂O₃ (segunda etapa); e desempenho físico-mecânico dos EWF de madeira Balsa comparados com EWF Com, a fim de validar a aplicação dos EWF Balsa em diversos setores da construção civil com uso em pisos (terceira etapa).

5.1. Primeira etapa – Caracterização da Matéria-Prima

5.1.1. Propriedades Físicas e Químicas da Madeira Balsa Residual

A Tabela 5 apresenta valores médios obtidos das propriedades físicas e químicas da madeira Balsa. A matéria-prima analisada com o intuito de ser utilizada na confecção dos painéis OSB (segunda etapa), apresentou uma baixa densidade (143 kg/m³) e, dentre os três constituintes elementares a preponderância da celulose.

Tabela 5 - Valores médios das propriedades físicas e química da madeira Balsa residual e outras madeiras

Amostra	Densidade Aparente (kg/m ³)	pH	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Fonte
Balsa	143	5,52	71,15	8,73	7,68	Presente pesquisa
<i>Pinus spp</i>	560*	4,48	51,13	15,10	27,29	Fiorelli et al. (2014)
<i>Eucalyptus urophylla (Timor)</i>	510**	---	52,00	19,04	28,60	Megaton et al. (2006)
<i>Eucalyptus urograndis (hibrido)</i>	449	---	49,04	29,41	21,55	Hsing, de Paula, de Paula (2016)

* Pinus Elliotti – Fonte: NBR7190-1997. **Fonte: Brito & Barrichelo (1977).

Adaptado pelo autor.

Ao analisar a densidade aparente das partículas de madeira Balsa residual com as densidades das espécies de madeiras utilizadas industrialmente na produção de painéis OSB (Tabela 5), observa-se que a madeira da presente pesquisa possui densidade inferior. O pH, ácido, é similar ao *Pinus spp*. Em comparação às madeiras de

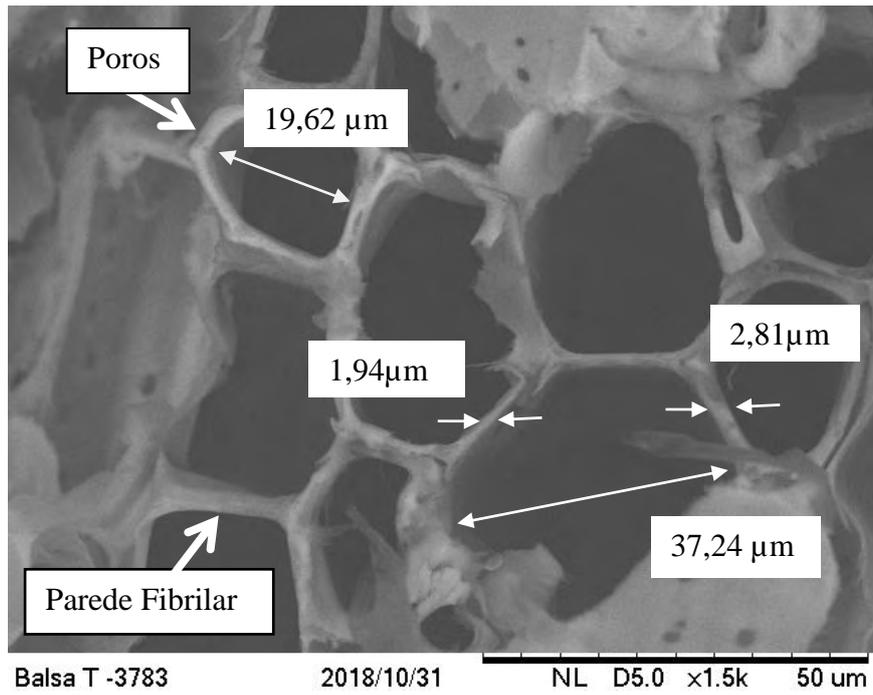
Pinus spp. e *Eucalyptus*, a composição química das partículas de madeira Balsa tem teores superiores de celulose e inferiores de hemicelulose e lignina.

De acordo com D'almeida (1988) a celulose e hemicelulose apesar das semelhanças, diferem entre as suas reatividades, pois as hemiceluloses pelas configurações irregulares e ramificadas absorvem água mais facilmente que a celulose. Segundo Fengel e Wegener (1984), o alto conteúdo de celulose aumenta a resistividade da madeira, enquanto o alto teor de lignina melhora a rigidez, conferindo melhores propriedades mecânicas aos painéis. A lignina é um componente que atua como agente selante, por isso é uma propriedade aglomerante de extrema importância, ou seja, altos teores de lignina proporcionam uma melhora na aglomeração das partículas nos painéis. Assim como apresentado na Tabela 5, o teor de lignina na madeira Balsa estudada mostrou-se inferior quando comparado às outras madeiras comerciais, o que reflete a necessidade de maiores teores de resina para garantir uma adequada aglomeração das partículas.

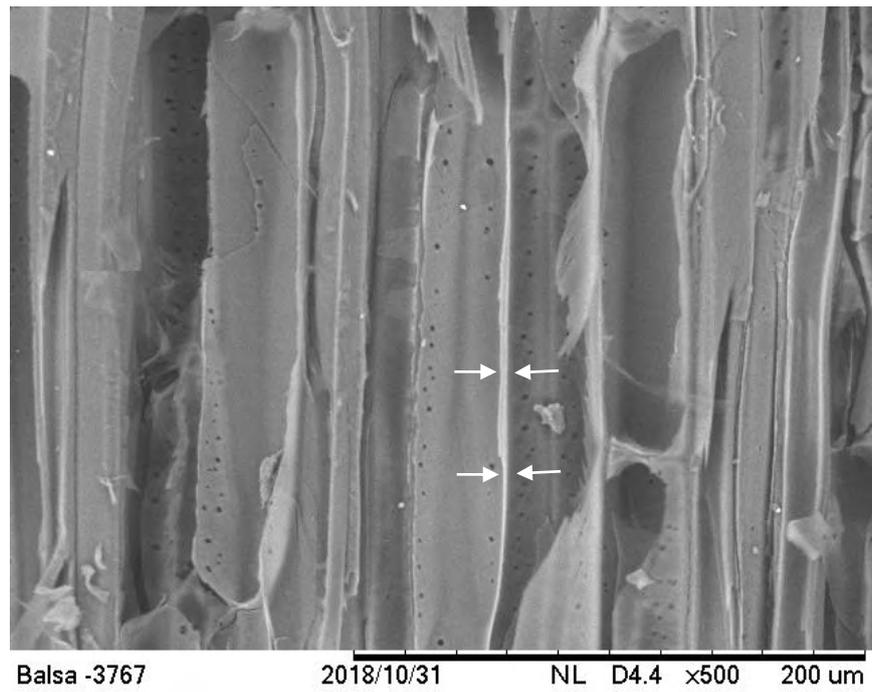
Vale destacar também que a madeira Balsa apresentou baixa densidade e valores de concentração de outros componentes como, por exemplo, a celulose e a hemicelulose, aproximados em relação as espécies de madeiras utilizadas comercialmente na produção de OSB, fato que a torna uma madeira com potencial para uso na produção desse tipo de painel. Em pesquisa recente, Lopes Junior et al. (2021) apresentaram resultados similares as propriedades químicas da madeira Balsa residual quando comparado aos resultados da atual pesquisa. A densidade aparente encontrada pelos autores (210 kg/m^3) foi menor e outros componentes químicos, como celulose e hemicelulose, com valores semelhantes quando comparada com as madeiras comerciais utilizadas na produção de painéis OSB. Isso faz dessa uma madeira potencial para usar na produção deste tipo de painel, mesmo que essa característica reflita em um maior volume de partículas para produzir os painéis e, conseqüentemente, maiores teores de resina para garantir uma aglomeração mais efetiva das partículas.

5.1.2. Análise Microestrutural da Madeira Balsa Residual

Na Figura 22 foi apresentada a seção transversal de uma amostra de madeira Balsa residual. Com aumento de 1.500x é possível visualizar os diâmetros dos poros, a espessura das paredes fibrilares e o diâmetro dos vasos.



(a)



(b)

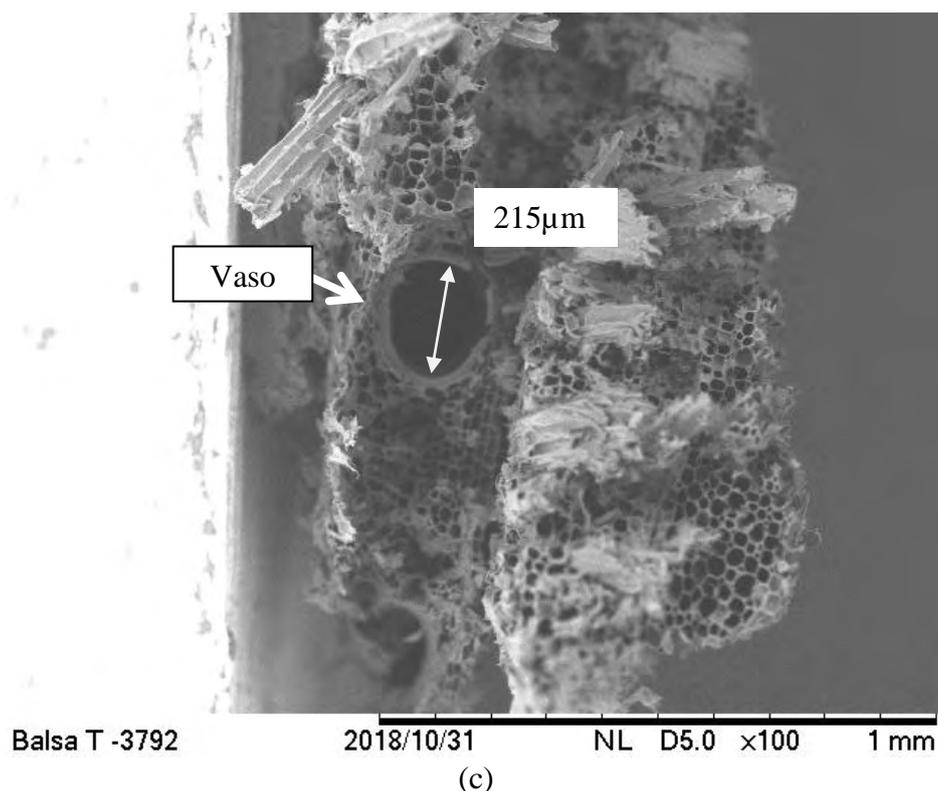


Figura 22 - Corte transversal de partícula de madeira Balsa residual. (a) Diâmetro dos poros (imagem ampliada 1.500x). (b) Espessura das paredes fibrilares (imagem ampliada 500x). (c) Diâmetro dos vasos (imagem ampliada 200x).

Fonte: Próprio autor

Na Figura 22(a) foi possível identificar os valores correspondentes aos diâmetros dos poros das partículas de madeira Balsa residual. Na Figura 22(b) a espessura das paredes fibrilares variam de 1,94 a 2,82 μm . Essas dimensões encontradas para a espessura fibrilar da madeira Balsa residual a caracteriza como uma espécie de madeira moldável, garantindo assim maior superfície de contato entre as partículas e, conseqüentemente, painéis OSB com propriedades mecânicas superiores em comparação com aqueles produzidos com espécies de madeira que apresentam parede fibrilar de maior espessura. Para corroborar com o fato de que a madeira Balsa possui paredes fibrilares inferiores a madeiras comerciais, Fiorelli et al. (2014) identificaram através da microscopia eletrônica de varredura que o diâmetro dos poros e a espessura das paredes fibrilares para madeira *Pinus* spp. é em média 5 μm , valor duas vezes maior que encontrado nesta pesquisa para madeira Balsa.

A Figura 22(c) apresenta as fibrilas e os vasos fibrilares cuja anatomia é característica para partículas de material com baixa densidade, como apresentado na Tabela 5 para madeira Balsa, e também, é possível comprovar que por apresentar alta porosidade, as partículas de madeira Balsa quando aplicadas na produção de painéis

OSB, serão captadoras de resina, contribuindo positivamente com a dispersão entre as partículas, no momento da conformação dos painéis. Em contrapartida, pelo fato de apresentar baixa densidade, é necessário um volume de partículas em massa, superior ao utilizado com madeiras de densidades superiores, conseqüentemente há necessidade de uma maior quantidade de resina para adequada conformação dos painéis OSB e eficiente adesão das partículas.

Outros autores, como Easterling et al. (1982), Da Silva e Kyriakides (2007), Borrega et al. (2015), e Lopes Junior et al. (2021) também comprovam esta alta porosidade da madeira Balsa e identificaram diâmetro de vasos variando de 200 a 350 μm .

5.1.3. Considerações Parciais da Primeira Etapa

A densidade aparente das partículas de madeira Balsa foi de 143 kg/m^3 , valor muito inferior ao de algumas espécies de madeira. Na análise química foi constatado que a madeira Balsa possui altos teores de celulose. Em contrapartida, as partículas exibiram quantidades inferiores de lignina e de hemicelulose.

Com a análise microestrutural foi possível identificar que a madeira Balsa apresenta uma quantidade elevada de vazios em sua morfologia (similar a um favo de mel), o que corrobora a com a baixa densidade encontrada quando comparado com outras espécies de madeira.

5.2. Segunda etapa – Caracterização dos Painéis OSB com Micropartículas Incorporadas

Nos próximos itens são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação (CV) das propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados com 0 (referência – Ref.), 1, 2 e 3% de ZnO e de Al_2O_3 , cabendo destacar que os valores-p do teste de normalidade de Anderson-Darling para todas as propriedades e em todas as composições foi superior ao nível de 5% de significância, o que valida os resultados obtidos dos intervalos de confiança da média. Além do mais, os valores dessas propriedades foram comparados com a recomendação do documento normativo europeu EN 300:2002 para painéis OSB tipo 2 (para fins estruturais utilizados em ambiente seco).

5.2.1. Propriedades Físicas e Mecânicas dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual Incorporados com Micropartículas de ZnO

A Tabela 6 apresenta os resultados médios das propriedades físicas e mecânicas para inchamento em espessura (IE), módulo de ruptura (MOR), módulo elástico (MOE) e adesão interna (AI) de painéis OSB referência e com adição de micropartículas de ZnO.

Tabela 6 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de ZnO

Composição	IE	MOR		MOE		AI
	(%)	(MPa)		(MPa)		(MPa)
	24 horas	Long.	Trans.	Long.	Trans.	
C-Ref.	30,77 ^b	27,26 ^a	12,99 ^b	4514 ^a	1280 ^b	0,29 ^a
(CV)	22,91	24,99	24,43	33,54	15,13	21,58
C1-Z	44,84 ^{ab}	29,50 ^a	13,03 ^b	4479 ^a	1389 ^b	0,30 ^a
(CV)	14,11	24,04	11,81	18,49	12,27	23,65
C2-Z	45,38 ^{ab}	28,44 ^a	14,04 ^b	4401 ^a	1440 ^b	0,26 ^a
(CV)	45,77	30,67	22,15	18,93	16,45	45,52
C3-Z	54,48 ^a	26,90 ^a	17,10 ^a	4213 ^a	2009 ^a	0,29 ^a
(CV)	19,56	25,33	23,63	16,83	17,82	22,40
EN 300:2002 Tipo 2	20	22	11	3500	1400	0,34

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem significativamente a 5% pelo Teste Tukey

Ao analisar as composições com micropartículas de ZnO, na Tabela 6, foi observado para a propriedade física de IE, que as composições com 1, 2 e 3% de ZnO não apresentaram diferença estatística entre si (pelo compartilhamento b e ab), porém, a referência (C-Ref.) e C3-Z diferem estatisticamente para essa propriedade. O mesmo não pode ser dito do C-Ref e os painéis OSB com 1 e 2% de ZnO que apresentam desempenho equivalente (compartilhamento a).

Com relação a resistência e a rigidez na flexão estática aferidas na direção longitudinal (MOR e MOE longitudinal), a inclusão do ZnO com os teores analisados (1, 2 e 3%) não promoveu alterações significativas nos valores médios dessas propriedades, tendo o desempenho equivalente (pelo compartilhamento a). Na direção transversal, a composição C3-Z apresentaram valores médios superiores à referência, porém, as composições com aditivos de ZnO diferem em desempenho (pelo compartilhamento a e b). Entretanto, a composição com 2% de ZnO e o referência não diferem estatisticamente (pelo compartilhamento b).

Na resistência à tração perpendicular ou AI, o melhor desempenho levando em consideração os valores médios apresentados foi notado para os pisos feitos com 1% de ZnO, apesar de ser inferior à condição imposta pela norma EN300:2002. Porém, ambas as composições com ZnO e a referência não apresentaram diferença estatística entre si e desempenhos equivalentes (compartilhamentos iguais, a).

Embora as composições com ZnO apresentem algumas diferenças estatísticas, todas atenderam as recomendações da norma EN 300:2002, painéis do Tipo 2, para as propriedades mecânicas de MOR e MOE, enquanto AI não foi alcançada em nenhuma composição analisada. Já para a propriedade física de IE foi notável que nenhuma das composições propostas tiveram influência positiva quando comparado com C-Ref e não atingiram a recomendação mínima exigida pela EN 300:2002.

Silva et al. (2019) avaliaram as propriedades físicas de painéis MDF (*medium density fiberboard*) de média densidade, aglomerados com resina UF e melanina-formaldeído acrescentando 0,5% e 1,0% de nanopartículas de ZnO. Os resultados mostraram que a adição de 0,5% de nanopartículas com resina melanina-formaldeído resultou em painéis de maior densidade, menor teor de umidade e, após imersão em água por 24 horas, menores valores de inchamento em espessura. Estes resultados são explicados pela maior compactação das placas devido à rápida cura do adesivo. O tratamento usando maior porcentagem (1%) de nanopartículas de ZnO não apresentaram resultados estatisticamente inferiores aos resultados de 0,5% de nanopartículas.

5.2.2. Propriedades Físicas e Mecânicas dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual Incorporados com Micropartículas de Al₂O₃

Os painéis produzidos com as micropartículas de Al₂O₃, também com teores de 1, 2 e 3%, apresentaram conforme Tabela 7, os valores médios dos ensaios físico e mecânicos das propriedades IE, MOR, MOE e AI.

Tabela 7 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de Al_2O_3

Composição	IE (%)	MOR (MPa)		MOE (MPa)		AI (MPa)
		24 horas	Long.	Trans.	Long.	
C-Ref.	30,77 ^a	27,26 ^a	12,99 ^b	4514 ^a	1280 ^b	0,29 ^b
(CV)	22,91	24,99	24,43	33,54	15,13	21,58
C1-A	38,35 ^a	27,23 ^a	12,40 ^b	4162 ^a	1266 ^b	0,40 ^{ab}
(CV)	17,37	14,57	12,76	11,61	11,66	33,08
C2-A	26,49 ^a	30,96 ^a	16,77 ^a	4726 ^a	1795 ^a	0,45 ^a
(CV)	29,28	30,92	10,42	23,67	14,34	33,98
C3-A	34,96 ^a	27,33 ^a	16,96 ^a	3858 ^a	1640 ^{ab}	0,39 ^{ab}
(CV)	41,35	30,06	17,95	26,25	27,65	31,12
EN 300:2002 Tipo 2	20	22	11	3500	1400	0,34

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem significativamente a 5% pelo Teste Tukey

Para a propriedade física de IE, ao analisar as composições com micropartículas de Al_2O_3 , foi observado que as composições com 1, 2 e 3% de Al_2O_3 e também a composição referência não apresentaram diferença estatística entre si (pelo compartilhamento a), conseqüentemente, apresentam desempenho equivalente. Entretanto, ao comparar o valor médio para essa propriedade, é possível identificar que a composição com 2% de Al_2O_3 apresentou valores médios abaixo das outras composições analisadas.

Com relação à resistência e rigidez na flexão estática aferidas na direção longitudinal, tanto para o MOR quanto o MOE, a inclusão de Al_2O_3 com os teores de 1 a 3% não promoveram diferenças estatísticas significativas (pelo compartilhamento a), apresentando desempenho equivalente ao C-Ref. Entretanto, ao comparar o valor médio para essa propriedade, é possível identificar que a composição com 2% de Al_2O_3 apresentou valores médios acima das outras composições. Na direção transversal, tanto para o MOR e MOE, as composições C2-A e C3-A apresentaram valores médios superiores à referência e se assemelham em desempenho (pelo compartilhamento a).

Na resistência à tração perpendicular ou AI, o melhor desempenho levando em consideração os valores médios apresentados foi notado para os painéis feitos com 2% de Al_2O_3 , que difere estatisticamente do C Ref. Esse resultado pode indicar que a aglomeração das partículas foi beneficiada com a adição das micropartículas. Embora as composições apresentem algumas diferenças estatísticas, todos atenderam as recomendações da norma EN 300:2002, painéis do Tipo 2, para as propriedades

mecânicas. Já, para a propriedade de IE apresentarem média de C1-A, C3-A e C-Ref inferiores ao recomendado pela norma, no entanto, ao analisar apenas os valores médios obtidos para essa propriedade, infere-se ainda que no limite de IE = 25% recomendado na EN 300:2002 para painéis do tipo 1, a composição C2-A (2% de Al_2O_3) é selecionada como a mais adequada para produção de painéis OSB com partículas de madeira Balsa residual para painéis do tipo 2 (para fins estruturais utilizados em ambiente seco).

Kumar et al. (2013) avaliaram os efeitos das nanopartículas de Al_2O_3 nas propriedades físicas, mecânicas e de transferência de calor do MDF. As nanopartículas foram adicionadas em dois níveis, 0,5 % e 1,0 % do peso seco das fibras de madeira. O perfil da temperatura dentro do painel e a condutividade térmica foram melhorados pela adição de nanopartículas de Al_2O_3 , aumentando subsequentemente a aderência das fibras. O módulo de ruptura e o módulo de elasticidade foram superiores pela adição de nanopartículas de Al_2O_3 em relação às amostras de referência e houve redução no inchamento em espessura dos painéis com nanopartículas em relação a referência.

Zhang et al. (2018) concluíram em seu trabalho que as nanopartículas de Al_2O_3 , ao ser utilizada juntamente ao adesivo FF em painéis compensados, melhoram o desempenho da resina, resultando em um aumento de até 20% em algumas propriedades mecânicas, como a resistência ao cisalhamento. Além do mais, os autores mostraram que as partículas incorporadas no adesivo instituem uma capacidade de acelerar e otimizar o processo de cura da resina, o que poderia aumentar a eficiência da fabricação de painéis e reduzir os custos de energia na produção.

Ao comparar os 2 tipos de micropartículas (ZnO e Al_2O_3), foi possível identificar que ambas as composições apresentaram o mesmo efeito positivo sobre as propriedades mecânicas, sendo superiores à composição sem micropartículas (Referência), porém, as composições com Al_2O_3 para propriedade física não apresentaram resultados significativos quando comparados a referência e foram superiores em relação as composições com ZnO para os valores médios obtidos. Entretanto, nas próximas etapas do projeto, serão produzidos mais painéis com 2% de Al_2O_3 e serão avaliadas as propriedades físicas, com um maior número de repetições, a fim de validar a eficácia da adição de micropartículas de Al_2O_3 em painéis OSB de madeira Balsa residual aglomerada com resina PU de mamona.

5.2.3. Propriedade Térmica dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual com Micropartículas de ZnO e Al₂O₃ Incorporadas

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores médios obtidos no ensaio de condutividade térmica para os painéis produzidos com as micropartículas de Al₂O₃ e ZnO, respectivamente, com diferentes teores (1, 2 e 3%), assim como o painel referência (C-Ref).

Tabela 8 - Valores médios da propriedade térmica de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de Al₂O₃

Composição	Condutividade térmica (W/m·K)
C-Ref.	0,15 ^a
(CV)	5,48
C1-A	0,12 ^b
(CV)	7,11
C2-A	0,12 ^b
(CV)	3,63
C3-A	0,12 ^b
(CV)	7,11
NBR 15220:2003	
Média densidade	0,17

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem significativamente a 5% pelo Teste Tukey

Ao analisar a condutividade térmica as composições com micropartículas de Al₂O₃, foi observado que as composições com teores (1, 2 e 3%) não apresentaram diferença estatística entre si (pelo compartilhamento b), conseqüentemente, apresentam desempenho equivalente. Entretanto, as composições propostas com Al₂O₃ e a C-Ref diferem estatisticamente (pelo compartilhamento b e a). Segundo Scalan (2012), ao aumentar a temperatura do Al₂O₃, a sua condutividade térmica tende a diminuir devido ao efeito refratário característico por ser considerado um material cerâmico, o que pode ter influenciado nesse resultado.

Gupta et al. (2018) estudou três tipos diferentes de nanofiltros, sendo nanopartículas comerciais de Al₂O₃ e carvão ativado, além de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (CNTs), os quais foram misturados com resina de UF e utilizados na preparação de painéis de fibras de média densidade (MDF). O autor constatou que a mistura de Al₂O₃ com resina UF promoveu melhora na transferência de calor durante a prensagem a quente com redução do tempo de cura do adesivo, além disso, as

propriedades físicas e mecânicas do MDF melhoraram significativamente com a nanopartícula de Al_2O_3 .

Tabela 9 - Valores médios da propriedade térmica de painéis OSB com resina PU de mamona e micropartículas de ZnO

Composição	Condutividade térmica (W/m·K)
C-Ref.	0,15 ^a
(CV)	5,48
C1-Z	0,13 ^a
(CV)	7,76
C2-Z	0,13 ^a
(CV)	6,15
C3-Z	0,13 ^a
(CV)	7,76
NBR 15220:2003 Média densidade	0,17

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem significativamente a 5% pelo Teste Tukey

Ao analisar as composições com micropartículas de ZnO, foi observado que as composições com 1, 2 e 3% não apresentaram diferença estatística entre si (pelo compartilhamento a), conseqüentemente, apresentam desempenho equivalente. O mesmo fato ocorre quando comparamos as composições propostas com ZnO e a C-Ref, tendo o mesmo desempenho (pelo compartilhamento a).

Destaca-se ainda que as micropartículas utilizadas (Al_2O_3 e ZnO) são óxidos que podem ter proporcionado um efeito refratário, característicos de alguns materiais cerâmicos. Materiais com efeito refratário tendem a apresentar baixa condutividade térmica. Para Wang (1988), materiais que apresentem condutividade térmica menor que 0,25(W/m·K) são geralmente considerados isolantes térmicos. Por outro lado, de acordo com Panyakaew e Fotios (2011) por se tratar de um painel de origem vegetal contendo fibras celulósicas, a condutividade térmica deve variar entre variando de 0,04 e 0,045 (W/m.K), o que corrobora com o que foi apresentado para todas as composições de Al_2O_3 (1, 2 e 3%) com 0,12W/m·K e também para todas as composições de ZnO (1, 2 e 3%) com 0,13W/m·K.

No entanto, o Al_2O_3 apresenta maior capacidade de isolamento térmico por apresentar menor condutividade térmica do que o ZnO. Segundo Al-Homoud (2005), o teor de umidade é o principal fator que afeta a condutividade térmica nos materiais

isolantes. Nesses materiais, os espaços vazios são preenchidos com ar (baixa condutividade térmica) e ao absorver umidade do ambiente o ar passa a ser substituído pela água (maior condutividade térmica). Assim, quanto maior o conteúdo de água no material, maior será sua condutividade térmica e pior seu desempenho térmico. Corroborando com os valores médios obtidos para as propriedades físicas de IE (Tabela 6 e 7), tendo as composições com ZnO pior desempenho físico e maior condutividade térmica quando comparado com Al₂O₃ que teve melhor desempenho físico e menor condutividade térmica.

5.2.4. Propriedades Físicas e Mecânicas dos Painéis OSB de Madeira Balsa Residual após Ensaio de Intemperismo Acelerado

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação (entre parênteses) dos quatro tratamentos experimentais idealizados da etapa após o intemperismo acelerado.

Tabela 10 – IE e AI de amostras antes e após ensaio de intemperismo acelerado

Composição	Intemperismo	IE 24h (%)	AI (MPa)
C-Ref	Sim	25.72 (26.77)	0.12 (55.90)
C-Ref	Não	30.77 (22.91)	0.29 (21.58)
C2-A	Sim	14.34 (34.08)	0.18 (45.63)
C2-A	Não	26.49 (29.28)	0.45 (33.98)

Fonte: Próprio autor

Para a propriedade física de IE e a propriedade mecânica de AI, ao analisar as médias obtidas com a composição em 2% de micropartículas de Al₂O₃, e também a composição referência antes do intemperismo, é possível observar o que o desempenho de C2-A foi superior ao C-Ref, comportamento apresentado também na Tabela 10.

Ao avaliar o valor médio das propriedades física e mecânica após o intemperismo artificial, é possível identificar que a composição com 2% de Al₂O₃ apresentou valores médios de IE abaixo das outras composições analisadas e valor de AI superior à referência, o que mostra a eficiência das micropartículas e melhora na resistência à degradação quando incorporadas nos painéis de madeira Balsa de reflorestamento residual reconstituída.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Tabela 11 - Resultados do teste de contraste de médias de Tukey.

Propriedades	Antes do Intemperismo		Após o Intemperismo	
	C-Ref	C2-A	C-Ref	C2-A
IE 24h	A	A	A	B
AI	A	A	A	A
	C-Ref		C2-A	
	Não Intemperismo	Intemperismo	Não Intemperismo	Intemperismo
IE 24h	A	A	A	B
AI	A	B	A	B

- Letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si. Letras distintas implicam em tratamentos com médias significativamente diferentes, sendo o maior valor da propriedade representado pela letra A e o menor pela letra B.

Ao analisar a Tabela 11, os resultados obtidos com a análise estatística antes do intemperismo revela que a inclusão de 2% de Al_2O_3 não promoveu ganhos as propriedades física e mecânica dos painéis analisados, visto que não promoveram diferenças estatísticas significativas (pelo compartilhamento A), apresentando desempenho equivalente ao C-Ref. Entretanto, os dados obtidos após o intemperismo acelerado mostram a eficiência de 2% das micropartículas de Al_2O_3 a longo prazo quando incorporados nos painéis OSB, uma vez que apresentaram diferenças estatísticas significativas (pelo compartilhamento A em C-Ref e B em C2-A).

5.2.5. Considerações Parciais da Segunda Etapa

Os painéis OSB produzidos com densidade de 650 kg/m^3 e 13% de resina PU de mamona e micropartículas incorporadas de Al_2O_3 apresentaram propriedades mecânicas que atendem as exigências da norma EN 300:2002 para placas OSB do tipo 2.

As composições com 1, 2 e 3% de ZnO nos painéis OSB de madeira Balsa residual não ocasionaram melhorias significativas para propriedade de física, sendo que nenhuma das composições propostas atingiu a recomendação mínima exigida pela EN 300:2002.

O ensaio térmico mostrou que as micropartículas utilizadas (Al_2O_3 e ZnO) apresentaram baixa condutividade térmica visto que são óxidos e podem ter proporcionado um efeito refratário, característicos de alguns materiais cerâmicos. No entanto, o Al_2O_3 apresenta maior capacidade de isolamento térmico por apresentar menor condutividade térmica do que o ZnO.

O ensaio de intemperismo acelerado provocou degradação nos painéis OSB de madeira Balsa residual, entretanto, os resultados mostraram que uso de 2% de Al_2O_3

tiveram eficiência a longo prazo e desempenho superior, quando comparado à referência (sem adição de micropartículas).

5.3. Terceira etapa – Análise de Desempenho dos Pisos Engenheirados (EWF Balsa e Com)

Nos próximos itens são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação (CV) das propriedades física e mecânicas dos EWF Balsa e EWF Com. Assim como no item 5.2 da segunda etapa, vale ressaltar que os valores-p do teste de normalidade de Anderson-Darling para todas as propriedades e em todas as composições foi superior ao nível de 5% de significância, fator de validação para os resultados obtidos nos intervalos de confiança das médias apresentadas nos ensaios de delaminação em água fria, resistência ao esforço rolante, variação dimensional, abrasão, dureza janka e cisalhamento em bloco.

5.3.1. Delaminação em Água Fria

Na Tabela 12 são apresentados os resultados de delaminação em água fria (Daf) dos pisos avaliados.

Tabela 12 - Quantidade de amostras aceitas e não aceitas após cada ciclo de delaminação para EWF (Balsa e Com.).

Indicação ANSI/HPVA EF 2009	Ciclo I		Ciclo II		Ciclo III	
	EWF Balsa	EWF Com	EWF Balsa	EWF Com	EWF Balsa	EWF Com
Aprovados	9	11	5	7	2	4
Falharam	3	1	7	5	10	8
Total	12	12	12	12	12	12

Fonte: Próprio autor

Os resultados mostram que para cada tipo de EWF houve diferença pequena dos corpos de prova aceitos em cada ciclo de estresse, sendo o comportamento semelhante entre os dois pisos comparados, fato que evidencia o potencial do EWF Balsa para essa propriedade e a eficiência das micropartículas de Al_2O_3 incorporadas na camada suporte do EWF.

Borrega et al. (2015) e Lopes Junior et al. (2021) afirmaram que a anatomia da madeira Balsa é característica de material com baixa densidade, apresentando alta porosidade e uma facilidade para absorção de água. Taylor et al. (2008) afirma que os painéis OSB quando utilizados como base para revestimentos de piso ou contrapiso, se

tiverem contato direto com água, podem sofrer inchamento nas bordas, formando uma superfície irregular.

Kureli e Dongel (2020) avaliaram o desempenho físico de diferentes estruturas na formação da camada suporte dos EWF sob diferentes condições de umidade relativa e analisaram as taxas de absorção de água, inchamento e retenção de água pelos materiais. Os resultados mostraram que todos os tipos de pisos de madeira laminada apresentaram boa resistência ao inchamento. Os EWF de madeira laminada com núcleo de madeira compensada, álamo e os com núcleo de fibra de média densidade tiveram o melhor desempenho quando em ambientes de baixa umidade. Resultado que corrobora com o encontrado no presente estudo, uma vez que a camada suporte do EWF Balsa é composto por painéis de média densidade (650 Kg/m³).

Lopes Junior et al. (2023) avaliaram o desempenho de painéis de madeira reconstruída de partículas orientadas (OSB) de madeira Balsa residual de reflorestamento de média densidade (650 Kg/m³) com incorporação de micropartículas de Al₂O₃ em 1, 2 e 3% e sem adição de micropartículas (Referência). Os resultados obtidos indicaram que os painéis produzidos com 2% Al₂O₃ apresentaram propriedades de inchamento em espessura significativamente inferior (ao nível de 5% de significância) após serem submetidos ao intemperismo acelerado e adesão interna das partículas superior aos valores obtidos para os painéis referência, evidenciando o efeito positivo da incorporação das micropartículas de Al₂O₃ nos painéis OSB de madeira residual de média densidade.

5.3.2. Resistência ao Esforço Rolante

Na Figura 23 são apresentados os valores obtidos no ensaio de resistência ao esforço rolante para os pisos EWF Balsa e EWF Com sendo os valores médios, os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade), os valores extremos dos coeficientes de variação (CV) e os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) referentes aos valores da depressão (D) decorrentes do número (N) de viagens no ensaio de resistência ao esforço rolante (RER). No eixo x estão indicados os números de viagens realizadas (10, 25 e 50 viagens) e no eixo y a depressão causada nos materiais pelo estresse da carga.

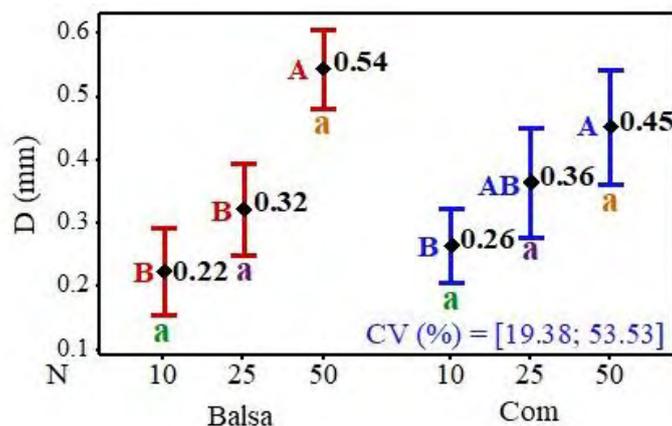


Figura 23 - Valores da depressão (D) dos EWF (Balsa e Com)

**Letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si pelo teste de Tukey*

As Letras maiúsculas (A e B) foram consideradas de maneira a revelar as possíveis diferenças nos valores da depressão (D) considerando apenas a influência do número de viagens em cada tipo de piso. As Letras minúsculas (a) foram atribuídas para identificar as possíveis diferenças nos valores da depressão confrontando-se ambos os materiais para cada número de viagem.

Para cada tipo de EWF (Balsa e Com) houve diferença nos valores médios da depressão em função do número de viagens, sendo o comportamento muito semelhante obtido entre os dois pisos comparados. Fixado cada número de viagem, foi notada equivalência estatística entre os valores médios da depressão, o que evidencia a similaridade entre os EWF para essa propriedade.

As médias de depressões encontradas na 50ª viagem foram um pouco acima das relatadas por Padilha et al. (2006). Esses autores obtiveram valor médio equivalente a 3,00 mm para madeiras clone de *Eucalyptus urophylla* de 8 anos de idade. Essa pequena diferença, comparado ao encontrado pelo presente estudo é decorrente da menor densidade da madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*).

5.3.3. Variação Dimensional

Na Figura 24 são apresentados os resultados acerca da variação dimensional dos EWF (Balsa e Com). No eixo x estão indicados os números de dias totais (15, 30 e 45 dias) decorridos durante os 3 ciclos (15 dias cada) de coletas de dados. Já no eixo y estão indicados a variação dimensional que os protótipos sofreram durante os 45 dias de ensaio.

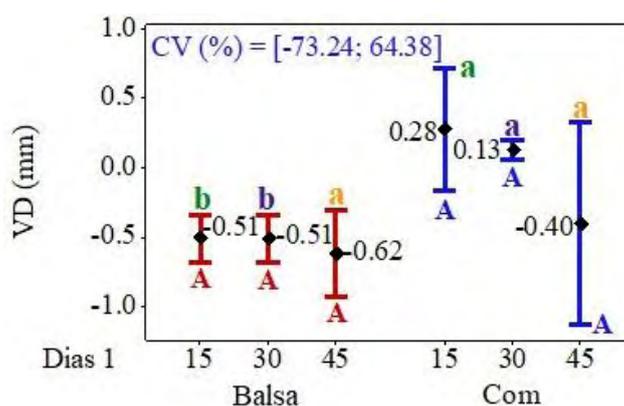


Figura 24 - Variação dimensional dos EWF (Balsa e Com)

**Letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si pelo teste de Tukey*

As Letras maiúsculas (A e B) foram consideradas de maneira a revelar as possíveis diferenças nos valores da variação dimensional (VD) considerando apenas a influência do número de dias em cada tipo de piso. As Letras minúsculas (a e b) foram atribuídas para identificar as possíveis diferenças nos valores da variação dimensional confrontando ambos os materiais para cada número de dias.

Para cada tipo EWF (Balsa e Com) houve diferença nos valores médios da variação dimensional (VD) em função do número de dias, sendo o comportamento muito distinto obtido entre os dois pisos comparados, destacando o alto valor do coeficiente de variação dos pisos comerciais obtidos nos 45 dias de teste. Fixado cada parcela de dias em que foi feita a coleta de dados (15, 30 e 45 dias) os resultados mostraram diferença estatísticas entre os pisos pelo compartilhamento (a e b) na primeira (15 dias) e segunda (30 dias) coleta de dados, sendo que o EWF Com teve desempenho superior ao EWF Balsa. Entretanto, foi notada equivalência estatística entre os valores médios da VD para a última coleta de dados (45 dias), fato que evidencia a similaridade entre os EWF para essa propriedade.

Barbuta et al. (2012) afirmam que tanto no modelo computacional desenvolvido quanto as amostras submetidas ao ensaio para avaliar a variação dimensional, apresentaram maiores variações após o ciclo úmido (verão). Os autores ressaltam que devido à alta umidade, as ações de estresse ou variação dimensional foram mais altas perto das bordas livres do EWF. Comportamento semelhante ao apresentado nessa pesquisa, sendo que os ciclos de verão (15 dias e 45 dias) foram os que apresentaram maior coeficiente de variação em ambos os materiais analisados (EWF Balsa e Com).

5.3.4. Abrasão

Na Figura 25 são apresentados os resultados da abrasão onde foram determinadas as perdas de espessura e de massa para os EWF (Balsa e Com).

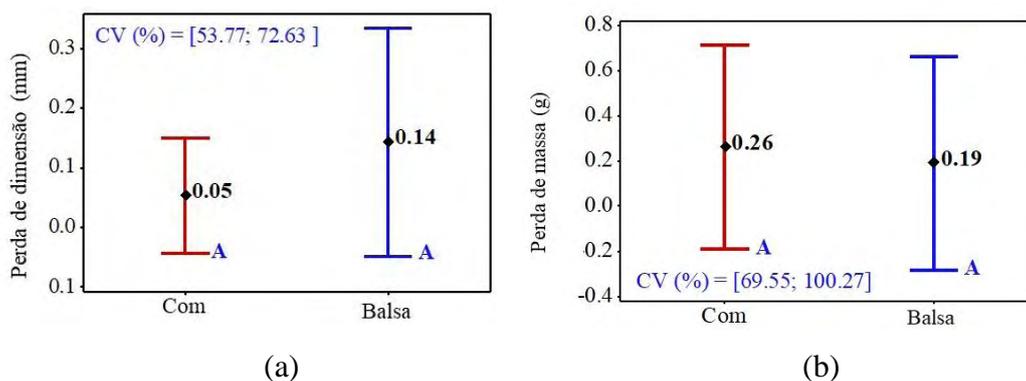


Figura 25 - Resultados da abrasão com base na perda dimensional (a) e perda de massa (b).

**Letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si pelo teste de Tukey*

No ensaio de abrasão foi identificada uma diferença nos valores médios da perda de espessura dos EWF (Balsa e Com). Para a perda de massa (b), os pisos apresentaram valores médios praticamente idênticos. Os resultados evidenciam equivalência estatística entre os valores médios da abrasão pelo compartilhamento (A), indicando a similaridade entre os pisos para essa propriedade.

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 para o EWF com (260

miligramas em 3600 ciclos) e um pouco acima do encontrado para o EWF Balsa (190 miligramas em 3600 ciclos) que apresentou a melhor média ou menor desgaste para o ensaio.

5.3.5. Dureza Janka

Na Figura 26 são apresentados os resultados da Dureza Janka (H) para os EWF (Balsa e Com).

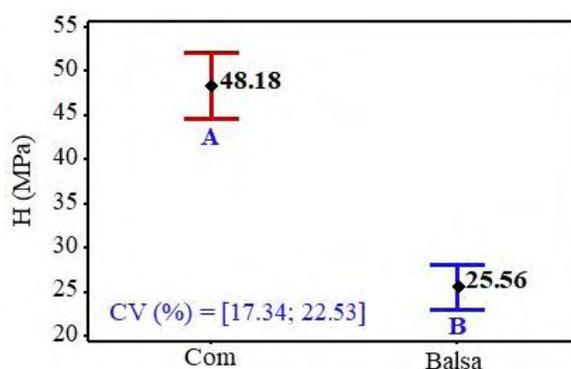


Figura 26 - Valores médios de Dureza Janka de EWF (Balsa e Com).

**Letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si pelo teste de Tukey*

No ensaio de Dureza Janka foi observado diferença nos valores médios, sendo o comportamento muito distinto entre EWF Balsa e Com. Os resultados também mostraram diferença estatística entre os valores médios da Dureza Janka pelo compartilhamento (A e B), sendo que o EWF comercial apresentou desempenho superior ao EWF Balsa.

A diferença na Dureza Janka pode ser justificada pela diferença entre os materiais constituintes da camada suporte, uma vez que a do EWF Com é um painel compensado de madeira de *Pinus spp.* e a do EWF Balsa um painel OSB de madeira Balsa residual, caracterizada por ser de baixa densidade e boa maleabilidade.

Carvalho et al. (2015) determinaram a Dureza Janka de painéis de partículas de *Pinus spp.* e erva mate, com densidade de 670 a 700 kg/m³, obtendo valores que variaram de 28,9 a 39,7 MPa, ou seja, bem próximo dos valores médios obtidos nesta pesquisa.

5.3.6. Cisalhamento em Bloco

Na Figura 27 são apresentados os resultados da resistência ao cisalhamento em bloco (Cis-BI) dos pisos avaliados.

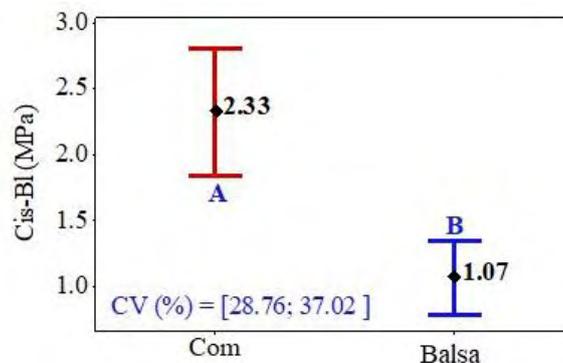


Figura 27 - Resultados da resistência ao cisalhamento em bloco de EWF (Balsa e Com)

**Letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si pelo teste de Tukey*

Para o ensaio de Cisalhamento em Bloco foi identificada diferença nos valores médios. Os resultados mostraram diferença estatística entre os valores médios do Cisalhamento em bloco pelo compartilhamento (A e B), sendo que o EWF Com apresentou desempenho superior ao EWF Balsa.

A diferença entre os resultados pode ser explicada em função do tipo e quantidade de adesivo utilizado na colagem da lâmina de Teca sobre a camada de suporte. O EWF Com foi produzido com resina de acetato de polivinila (PVA) e o EWF Balsa com resina PU de Mamona.

Blanchet et al. (2003) em sua pesquisa analisaram o cisalhamento em bloco de EWF com lâmina colada com adesivo uréia-formaldeído, melamina-uréia-formaldeído, polivinil acetato tipo III e poliuretano após ciclos de intemperismo acelerado. Os autores concluíram que o EWF composto por adesivo PUR obteve o melhor desempenho nessa avaliação.

5.3.7. Considerações Parciais da Terceira Etapa

Os ensaios executados nos EWF Balsa e EWF Com revelaram que a proposta de aplicação de um painel OSB de madeira Balsa residual com micropartículas de Al_2O_3 como camada suporte do EWF foi eficiente visto que apresentou resultados físicos e para algumas propriedades mecânicas desempenho semelhante ao EWF comercializado.

Para os testes de Abrasão e Esforço Rolante os EWF Balsa estatisticamente apresentaram desempenho similar ao comercial. Na Variação Dimensional o comportamento se manteve, porém vale ressaltar que o EWF Balsa apresentou homogeneidade nos resultados durante os 45 dias de teste.

Nos testes de Dureza Janka e Cisalhamento em Bloco, os EWF Balsa apresentaram desempenho inferior ao comercial. O resultado na Dureza Janka pode ser justificada pela diferença entre os materiais constituintes da camada suporte, uma vez que a madeira Balsa residual é caracterizada por ser de baixa densidade e boa maleabilidade. No Cisalhamento, a diferença pode ser explicada em função do tipo e quantidade de adesivo utilizado na colagem da lâmina de Teca sobre a camada de suporte. O que evidencia que a resina PU de mamona não é resina mais recomendada para função de adesivo no EWF.

No ensaio de delaminação em água fria, o comportamento dos EWF foram semelhantes, fato que evidencia o potencial do painel OSB de madeira Balsa residual como camada suporte para essa propriedade e a eficiência das micropartículas de Al_2O_3 incorporadas na camada suporte do EWF.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para as propriedades físicas, químicas e anatômicas do resíduo de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*) apresenta potencial para fabricação de painéis de partículas.

Os painéis OSB produzidos com densidade de 650 kg/m^3 , 13% de resina PU de mamona e 2% de micropartículas de Al_2O_3 apresentaram os melhores resultados para as propriedades físicas e mecânicas que atendem as exigências da norma EN 300:2002 para placas OSB do tipo 2, recomendados para fins estruturais utilizados em ambiente seco.

O uso de micropartículas de ZnO não resultaram em melhoria significativa para as propriedades mecânicas e físicas dos painéis OSB de madeira Balsa residual quando comparados a referência. Dessa forma, as micropartículas de ZnO não são indicadas para estes painéis de partículas.

A incorporação de 2% micropartículas de Al_2O_3 na camada suporte do EWF Balsa provou ser uma solução eficiente visto que o desempenho físico do produto se mostrou equivalente ao comercial. De forma geral, o EWF Balsa resultante da pesquisa pode ser utilizado na construção civil e áreas afins uma vez que apresentou estatisticamente desempenho físico e mecânico equivalente ao comercial para a maioria dos ensaios realizados, com exceção do cisalhamento em bloco e dureza janka, devido as características anatômicas da madeira Balsa e a cola PU de mamona utilizada como agente ligante.

REFERÊNCIAS

AL-HOMOUD, M. S. Performance Characteristics and Practical Applications of Common Building Thermal Insulation Materials. *Building and Environment*, 40, p. 353-366, 2005.

AMERICAN NATIONAL STANDARD – ANSI/HPVA EF 2009: American National Standard For Engineered Wood Flooring: ANSI, 2009. 20 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D 2394-83: Standard Methods for Simulated Service Testing of Wood and Wood-Base Finish Flooring. West Conshohocken: ASTM, 1999. 11 p.

_____. ASTM D 143: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken: ASTM, 2014. 31 p.

_____. ASTM D 905-03: Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading: ASTM, 2021. 5p.

_____. ASTM E1530-11: Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. West Conshohocken: ASTM, 2014. 9p.

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

_____. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2003.

BARBIRATO, G. H. A. LOPES JUNIOR, W. E. HELLMEISTER, V. PAVESI, M. FIORELLI, J. OSB Panels with Balsa Wood Waste and Castor Oil Polyurethane Resin. **Waste and Biomass Valorization**. Springer Nature B.V. 2018. September 2018.

BARBIRATO, G. et al. Quasi-static and dynamic response of oriented strand boards based on Balsa wood waste. *Composite Structures*, v. 219, 2019.

BARBOSA, J. C. et al. Medium Density Particleboard Reinforced With Bamboo Laminas. **BioResources**, v. 10, p. 330-335, 2015.

BARBUTA, C.; BLANCHET, P.; CLOUTIER, A.; YADAMA, V.; LOWELL, E. OSB as substrate for engineered wood flooring. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 70, no. 1–3, pp. 37–43, 2010.

BARROS FILHO, R. M. **Painéis aglomerado a base de bagaço de cana-de-açúcar e resinas uréia formaldeído e melamina formaldeído.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais – Processos de Fabricação, Departamento de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais. Ouro Preto, p. 99. 2009.

BLANCHET, P.; BEAUREGARD, R.; ERB, A.; LEFEBVRE, M. Comparative study of four adhesives used as binder in engineered wood parquet flooring. *For Prod J*, 53(1):89–93, 2003.

BONDUELLE, G. M.; IWAKIRI, S. Fatores que influenciam no rendimento em laminação de *Pinus spp.* *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 35-41, 2006.

BORREGA, M., AHVENAINEN, P., GIBSON, L. Mechanics of Balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Mechanics of Materials*. v. 84, p. 75-90. 2015.

BORTOLETTO JÚNIOR, G.; GARCIA, J. N. **Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis compensados e OSB.** *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 28, n. 4, p. 557-564, 2004.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I – densidade e teor de lignina da madeira de Eucalipto. *IPEF*, Piracicaba, n.14, p.9-20, 1977a.

BRITO, E. O. **Produção de chapas de partículas de madeira a partir de maravalhas de *Pinus elliotti* Engelm. Var. *elliotti* plantado no sul do Brasil.** 1995. 123 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

BUFALINO, L. et al. Alternative compositions of oriented strand boards (OSB) made with commercial woods produced in Brazil. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, Concepción, v. 17, n. 1, p. 105-116, 2015.

CAMPOS, A. C. M. et al. Near infrared spectroscopy to evaluate composition of agro-based particleboards. *Bioresources*, Raleigh USA, v. 4, p. 1058-1069, jun. 2009.

CAMPOS FILHO, et al. Oriented Strand Board panels of residual reforestation wood with Al₂O₃ nanoparticles. *Industrial Crops & Products*, 200(Part A), p. 1-7. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116777>

CARNEIRO, A. C. O. et al. Propriedades de chapas de flocos fabricadas com adesivo ureia-formaldeído e de taninos da casaca 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.

CHEN, Q., GUO, X., JI, F., WANG, J., WANG, J., AND CAO, P. Effects of decorative veneer and structure on the thermal conductivity of engineered wood flooring, *BioResources* 10(2): 2213-2222, 2015.

CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, S. A. M.; BARBOSA, J. C.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; PANZERA, T. H.; ROCCO LAHR, F. A. Produção de chapas de partículas com resíduos da madeira *Cordia goeldiana*. **Engenharia Agrícola** (Online), v. 35, p. 368-377, 2015.

CLOUTIER, A. **Oriented strandboard (OSB): raw material, manufacturing process, properties, and uses.** INTERNATIONAL SEMINAR ON SOLID WOOD PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGY, 1., 1998, Belo Horizonte, MG. p. 173-185.

CRAVO, J. C. M.; SARTORI, D.; MARMOL, G.; BALIEIRO, J. C. C.; MACHADO, G. O.; FIORELLI, J. Manufacture of particleboard based on cement bag and castor oil polyurethane resin. **Construction & Building Materials**, v. 87, p. 8-15, 2015.

DANIELS, Paul L. – **Working with Balsawood – The definitive guide to using Balsa.** 2013. Disponível em: <<http://pldaniels.com/flying/Balsa/Balsa-properties.html>> Acesso em: 13/09/2020.

D'ALMEIDA, M. L. O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: **Tecnologia de fabricação da pasta celulósica.** 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. Cap. 3.

DA SILVA, A.; KYRIAKIDES, S. Compressive response and failure of Balsa wood. **International Journal of Solids and Structures**, Kidlington, v. 44, p. 8685-8717, 2007.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. Tese (Doutorado) - Curso de Física e Química, Departamento de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 151. 2005.

DOS SANTOS, M. P.; AGUILAR, M. T. P. Painéis de madeira como vedação vertical em construções. *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, v. 14, n. 15, p. 242–263, 2007.

DURÁN, N.; MATTOSO, L. H. C.; MORAIS, P. C. Nanotecnologia: Introdução, preparação e caracterização de nanopartículas e exemplos de aplicação. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 208 p.

EASTERLING, K. E. et al. On the mechanics of Balsa and other woods. *Proceedings of The Royal Society A*, London, v. 383, p. 31-41, 1982.

ELEOTÉRIO, J. R. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p. 121. 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 300: Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB) – Definições, classificação e especificações. Portugal, 2002.

_____. EN 310: Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. [S.l.]: [s.n.], 2000.

_____. EN 317: Particleboards and fibreboards – Determination of swelling in thickness after immersion in water. [S.l.]: [s.n.], 1993.

_____. EN 319: Particleboards and fibreboards – Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. [S.l.]: [s.n.], 1993.

_____. EN323: Wood-based: determination of density. Bruxelas, 1993.

_____. EN 326: Wood-based panels - Sampling, cutting and inspection, 1994.

_____. EN14323: Wood-based panels – Melamine faced boards for interior uses. Test methods. EN, 2004.

FENGEL, D. e WEGENER, G. In: Wood Chemistry, Ultra Structure- Reactions, Walterde Gruyter, 1984, Berlin.

FERNÁNDEZ, M. A. V. Avaliação dos processos de polpação soda-antraquinona e bissulfito-base magnésio para bambu - Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ-USP. Piracicaba, p. 90. 2010.

FERREIRA, C. E. M.; CARRASCO, E. V. M.; HELMEISTER, J. C. Tecnologia de adesivos poliuretanos, propriedades e aplicações em madeiras. Anais. ed. São Carlos SP: EBRAMEM, v. LaMEM-EESC-USP, 1989.

FERRO, F. S. et al. Painéis OSB com madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 313-320, 2015.

FINGER, Z.; LOGSDON, N. B.; ROCHA, K. J. **Descrição dendrológica e caracterização física da madeira de Pau-de-Balsa, *Ochromapyramidale* (Cav. exLam) Urb.** Encontro Brasileiro Em Madeiras E Estruturas De Madeira. 2012. Vitória. Anais. UFES, 2012. CD-ROM 1.

FIORELLI, J. et al. Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers. **Cellulose**, Dordrecht, v. 21, p. 3269-3277, 2014.

GARAY R. M. **Efectos de dos Protectores Superficiales em las Propiedades de Tableros de Madera después de um Año de Exposición a la Intemperie.** Información Tecnológica. Vol. 20(4), p.123-130. 2009.

GHORBANI, S., RAZAVI, R. S., LOGHMAN-ESTARKI, M. R., ALHAJI, A. “Synthesis of MgO–Y₂O₃ composite nanopowder with a high specific surface area by the Pechini method,” *Ceramics International* 43(1), p. 345-354, 2017.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. Cellular solids: structure and properties. Cambridge: University Press, 1997.

GUPTA, A.; KUMAR, A.; SHARMA, K.v.; GUPTA, R. Application of High Conductive Nanoparticles to Enhance the Thermal and Mechanical Properties of Wood Composite. *Materials Today: Proceedings*, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 3143-3149, 2018.

HELLMEISTER, J. C. Sobre a determinação das características físicas da madeira. 1982. 119 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

HELLMEISTER, V. Painel OSB de resíduo de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*). Pirassununga: Universidade de São Paulo, 2017. Tese (Doutorado) - Faculdade De Zootecnia E Engenharia De Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

Hsing, T. Y.; de Paula, N. F.; de Paula, R. C. Características Dendrométricas, Químicas E Densidade Básica Da Madeira De Híbridos De *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016.

IRLE, M. A. et al. Wood Composites. In: ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: CRC Press, 2012.

IWAKIRI, S. A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus. 1989. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

IWAKIRI, S. et al. Utilização da madeira de eucalipto na produção de chapas de partículas orientadas - OSB. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 46-52, 2004.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba, PR: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S. et al. Influência da espessura de partículas e reforço laminar nas propriedades dos painéis de partículas orientadas OSB de *Pinus taeda* L. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 1, p. 116-122, jan./mar. 2009.

JANSSENS, D. P. The increasing recognition of oriented strandboard (OSB) as referred structural panel. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON SOLID WOOD PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGY, 1., 1998, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SIF, 1998. p. 169-172.

KARIMI, A.; TAGHIYARI, H.R.; FATTAHI, A.; KARIMI, S.; EBRAHIMI, G.H.; TARMIAN, T. Effects of wollastonite nanofibers on biological durability of poplar wood (*Populus nigra*) against *Trametes versicolor*. *BioResources* 8, p. 4134-4141, 2013.

KARPINSKI, L. A.; PANDOLFO, A.; REINEHER, R.; GUIMARÃES, J. C. B.; PANDOLFO, L. M.; KUREK, J. Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental. Porto Alegre: Edipucrs; 2009.

KHALIL, A.H.P.S.; FAZITA, M.R.; BHAT, A.H.; JAWAID, M.; FUAD, N.A. Development and material properties of new hybrid plywood from oil palm biomass. *Materials and Design*, Reigate, v. 31, p. 417-424, 2010.

KHODER, M. I. et al. Indoor and outdoor formaldehyde concentrations in homes. in: residential areas in Greater Cairo, J.E.M. 123p. Cairo: [s.n.]. 2000.

KUMAR, K., GUPTA, A., SHARMA, K. V., AND NASIR, M. Use of aluminum oxide nanoparticles in wood composites to enhance the heat transfer during hot-pressing, *European Journal of Wood and Wood Products* 71(2), 193-198. 2013.

KURELI, I.; DONGEL, N. Effect of the layer structure of wooden flooring on dimensional mobility under different relative humidity and water retention conditions. *Forest Products Journal*, 70(1):122-133, 2020.

LAMPRECHT, H. Silvicultura em los trópicos: los ecosistemas forestales em los bosques tropicales y sus especies arbóreas: posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1990.

LIMA, F. O. Análise da influência do tempo de prensagem na produção de chapas de partículas produzidas com resíduos de madeira. 2014. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2014.

LOPES JUNIOR, W. E. et al. Avaliação do teor ótimo de resinas orgânicas para produção de painéis OSB de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*) residual. *Scientia Forestalis*, v. 129, p. 1-11. 2021.

LOPES JUNIOR, W. E.; Cabral, M. R.; CHRISTOFORO, A. L.; CAMPOS, C. I.; FIORELLI, J. Investigating the effects of Al₂O₃ microparticles on wood waste OSBs: A Study on physical, mechanical, and durability performance. *Polymers*, 15(12), 2652. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15122652>

LORENZI, H. Árvores brasileiras. [S.l.]: plantarum-Verlag, 1992.

LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. D.; ALENCAR, J. D. C. **Essências madeireiras da Amazônia**. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia - Por Icones, Anatomy and morphology. *Plant records.*, 1979. 245 p.

MACEDO, L. B.; SILVA, M. R.; CÉSAR, A. A. S.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, A. F. Painéis OSB de madeira Pinus sp. e adição de partículas de polipropileno biorientado (BOPP). *Scientia Forestalis*, v. 44, p.143, 2016.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 3. ed. [S.l.]: São Francisco: M. Freeman, 1993.

MANTANIS, G. I.; PAPADOPOULOS, A. N. Reducing the thickness swelling of wood based panels by applying a nanotechnology compound. *Eur. J. Wood Prod*, January 2010.

MARTINS, L. M. F. Toxicologia de nanomateriais. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Instituto Superior de Egas Moniz, 2015.

MEGATON, A. S. et al. Composição química da madeira de eucalipto. IN: REUNIÃO ANNUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 29., 2006, Águas de Lindóia, SP. **Anais...** Águas de Lindóia, 2006. 1 CD-ROM.

MELLO DA SILVA, S. A. Chapa de media densidade (MDF) fabricada com poliuretano mono-componente derivada de óleo de mamona- caracterização por método destrutivo e por ultra som. 2003. Tese (Doutorado) – Curso em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2003.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; IWAKIRI, S. Revista da Madeira Wood Magazine, Edição Especial “Painéis”, p. 12, 2003.

MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; ABRANCHES, R.A.S.; SANTOS, R.C.; GUIMARÃES JR., J.B. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **ScientiaForestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, jun. 2010.

MUTLU, H. A. M. M. A. R. Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. Euro J. Lipid Science Technologie. 2010. ISSN doi:10.1002/ejlt.200900138.

NASCIMENTO, M. F. et al. **Painéis de Partículas Homogêneas Fabricados Com Resíduos Lignocelulósicos e Resina Alternativa Para Aplicação em Pisos.** *Scientia Forestalis*, v. 44, p. 1-8, 2016.

OLIVEIRA, C. **Mercado e potencial de biomassa para energia.** *Revista da Madeira*. Ed. **133** Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1631&subject=Biomassa&title=Mercado e potencial de biomassa para energia](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1631&subject=Biomassa&title=Mercado%20e%20potencial%20de%20biomassa%20para%20energia)>. Publicado em Dez 2012. Acesso em: 31 maio. 2017.

ORTUNÕ, T.G.; RODRÍGUES, J.A.; GARCÍA, M.T.F.; VILLENA, M.F.; GARCÍA, C.E.F. Evaluation of the physical end mechanical properties of particleboard made from giant reed (*Arundo donax* L.). *BioResources*, Raleigh, v. 6, n. 1, p. 477-486, 2011.

PANYAKAEW, S.; FOTIOS, S.; New Thermal Insulation Boards Made from Coconut Husk and Bagasse. *Energy and Buildings*, Lausanne, 2011, v.43, 1732-1739.

PETROVIC, Z. S. et al. Thermo setting resins from vegetable oils. In: Annual Technical Conference 57. New York: Proceedings... New York. 1999 1CD Rom.

PORTAL DA MADEIRA. **Uso de Madeira - Vantagens e desvantagens.** 2008. Disponível em: <<https://portaldamadeira.blogspot.com/2008/12/vantagens-e-desvantagens.html>>. Acesso em: 19 agosto 2021.

POZZER, T. F. ; BARBIRATO, G. H. A. ; GAUSS, C. ; FIORELLI, J. . Trapezoidal core sandwich panel produced with sugarcane bagasse. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 264, p. 1-6, 2020.

REMADE, Revista da Madeira. Painéis de Madeira MDP e MDF: Mercado e Competitividade. 2013. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1683&subject=Pain%20E9is&title=Pain%20E9is%20de%20Madeira%20MDP%20e%20MDF%20%96%20Mercado%20e%20Competitividade. Acesso em: 12 maio. 2021.

RONQUIM, R. M.; FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; CAMPOS, C. I.; BERTOLINI, M. S.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation. *International Journal of Composite Materials*, v. 4, p. 69-72, 2014.

ROUMELI, E.; PAPADOPOULOU, E.; PAVLIDOU, E.; VOURLIAS, G.; BIKIARIS, D.; PARASKEVOPOULOS, K. M.; CHRISAFIS, K. Synthesis, characterization and thermal analysis of urea-formaldehyde/nanoSiO₂ resins. *Thermochimica Acta*, 527, p. 33-39, 2012.

SALDANHA, L. K. **Alternativas tecnológicas para produção de chapas de partículas orientadas “OSB”**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SALMAN, A. K. D. et al. **Metodologias para avaliação de alimentos para ruminantes domésticos**. Porto Velho: Embrapa, 2010.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2002.

SILVA, A. J. P. **Aplicação de partículas longas e orientadas de bagaço de cana-deaçúcar na produção de painel particulado similar ao OSB**. 2006. 167 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Física de São Carlos, São Carlos, 2006.

SILVA, A. P. S.; FERREIRA, B. S.; FAVARIM, H. R.; SILVA, M. F. F.; SILVA, J. V. F.; AZAMBUJA, M. A.; CAMPOS, C. I. Physical Properties of Medium Density

Fiberboard Produced with the Addition of ZnO Nanoparticles. *BioResources*, v. 14, p. 1618-1625, 2019.

SORIANO, J.; FIORELLI, J.; LOPES JUNIOR, W. E.; BARBIRATO, G. H. A.; Deldotti, L. R. Numerical modeling for adjustment of the equivalent moduli of elasticity of OSB layers estimated from experimental flexural rigidity. *Journal of Materials Research and Technology* 14, p. 1630-1643, 2021.

TAYLOR, A.; WANG, S.; FREITAG, C.; MORRELL, J. J. Properties of 'enhanced' OSB subfloor panels. *Forest Prod J*, 58(5):77-9, 2008.

TSOUMIS, G. Veneer. **Science and technology of wood**: structure, properties, utilization. New York, 1991. p. 309-339.

VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; SILVA, D. A. L.; PANZERA, T. H.; ROCCO LAHR, F. A. Evaluation of modulus of elasticity in static bending of particleboards manufactured with *Eucalyptus grandis* wood and oat hulls. **Acta Scientiarum**. Technology (Impresso), v. 36, p. 405-411, 2014.

VARANDA, L. D.; YAMAJI, F. M.; SANTOS, L. R. O.; SILVA, D. A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical performance of particleboards using Castor oil-based adhesive. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, p. 707-712, 2018.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. - FPL-GTR, G. T. R. Wood Handbook: Wood as an engineering material. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. Cap. chapter 9, p. 199-222., p. 113.

VITAL, B. R. **Effects of species and panel densities on properties of hardwood particleboard**. 1973. 111p. (M.S.) – University of Wisconsin, Madison, 1973.

VURAL, M.; RAVICHANDRAN, G. Microstructural aspects and modeling of failure in naturally occurring porous composites. **Mechanics of Materials**, Amsterdam, v. 35, p. 523-536, 2003.

WANG, S. H. Construction Material Science, China Construction Industry Publisher, Beijing, 1988.

WEBER, C. **Estudo sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2011.

ZHANG, R.; JIN, X.; WEN, X.; CHEN, Q.; QIN, D. Alumina nanoparticle modified phenol formaldehyde resin as a wood adhesive. International Journal of Adhesion and Adhesives, [s.l.], v. 81, p. 79-82, mar. 2018. Elsevier BV.

APÊNDICE 1 – TABELAS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS PAINÉIS OSB

Tabela 13 - Síntese dos resultados do inchamento em espessuras após 24 horas de imersão em água (IE-24h).

Teor	X _m (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)
0% (Ref.)	30.77	22.91	20.88	38.30	(24.26; 37.29)
1% de OZ	44.84	14.11	36.43	53.02	(38.32; 51.35)
2% de OZ	45.38	45.77	24.59	89.11	(35.87; 54.89)
3% de OZ	54.48	19.56	34.65	71.43	(46.69; 62.27)
1% de OC	38.35	17.37	31.91	48.98	(31.83; 44.86)
2% de OC	26.49	29.28	18.35	43.81	(16.99; 36.00)
3% de OC	34.96	41.35	16.01	56.58	(27.17; 42.75)

Tabela 14 - Síntese dos resultados do módulo de ruptura a flexão na direção longitudinal (MOR-L).

Teor	X _m (MPa)	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)
0% (Ref.)	27.26	24.99	14.81	33.94	(22.39; 32.12)
1% de OZ	29.50	24.04	18.53	42.22	(24.64; 34.36)
2% de OZ	28.44	30.67	15.69	40.11	(21.73; 35.15)
3% de OZ	26.90	25.33	15.52	32.73	(21.09; 32.70)
1% de OC	27.23	14.57	22.50	34.60	(22.37; 32.10)
2% de OC	30.96	30.92	20.92	49.82	(24.25; 37.67)
3% de OC	27.33	30.06	14.87	39.09	(21.52; 33.13)

Tabela 15 - Síntese dos resultados do módulo de elasticidade a flexão na direção longitudinal (MOE-L).

Teor	X _m (MPa)	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)
0% (Ref.)	4514	33.54	1402	5731	(3692; 5336)
1% de OZ	4479	18.49	2958	5341	(3657; 5300)
2% de OZ	4401	18.93	2899	5227	(3457; 5345)
3% de OZ	4213	16.83	3162	4933	(3317; 5109)
1% de OC	4162	11.61	3363	4742	(3341; 4984)
2% de OC	4726	23.67	3072	6602	(3783; 5670)
3% de OC	3858	26.25	2657	5066	(2962; 4754)

Tabela 16 - Síntese dos resultados do módulo de ruptura a flexão na direção transversal (MOR-T).

Teor	X _m (MPa)	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)
0% (Ref.)	12.99	24.43	10.34	18.11	(10.06; 15.93)
2% de OZ	14.04	22.15	10.94	20.05	(11.85; 16.23)
3% de OZ	17.10	23.63	10.49	21.39	(14.36; 19.84)
2% de OC	16.77	10.42	14.47	18.90	(14.57; 18.95)
3% de OC	16.96	17.95	14.03	21.88	(14.22; 19.70)

Tabela 17 - Síntese dos resultados do módulo de elasticidade a flexão na direção transversal (MOE-T).

Teor	X _m (MPa)	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)
0% (Ref.)	1280	15.13	1092	1674	(1096.6; 1463.2)
2% de OZ	1440	16.45	1141	1905	(1256.4; 1623.0)
3% de OZ	2009	17.82	1704	2583	(1730; 2288)
2% de OC	1795	14.34	1577	2158	(1612.0; 1978.6)
3% de OC	1640	27.65	1228	2586	(1361; 1920)

Tabela 18 - Síntese dos resultados da resistência a tração perpendicular (TP).

Teor	X _m (MPa)	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)
0% (Ref.)	0.29	21.58	0.20	0.39	(0.23; 0.35)
1% de OZ	0.30	23.65	0.17	0.39	(0.23; 0.35)
2% de OZ	0.26	45.52	0.14	0.47	(0.18; 0.33)
3% de OZ	0.29	22.40	0.18	0.42	(0.23; 0.34)
1% de OC	0.40	33.08	0.20	0.57	(0.33; 0.46)
2% de OC	0.45	33.98	0.23	0.66	(0.37; 0.52)
3% de OC	0.39	31.12	0.21	0.62	(0.33; 0.44)

Tabela 19 - Síntese dos resultados da condutividade térmica (λ).

Teor	X _m (W/m·K)	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)
0% (Ref.)	0.15	5.48	0.14	0.15	(0.13; 0.15)
1% de OZ	0.13	7.76	0.12	0.14	(0.11; 0.13)
2% de OZ	0.13	6.15	0.12	0.14	(0.12; 0.14)
3% de OZ	0.13	7.76	0.12	0.14	(0.12; 0.14)
1% de OC	0.12	7.11	0.11	0.13	(0.11; 0.13)
2% de OC	0.12	3.63	0.12	0.13	(0.11; 0.13)
3% de OC	0.12	7.11	0.11	0.13	(0.11; 0.13)

ANEXO 1 – TABELAS DA EN 300/2002

Tabela 20 - Painéis para usos gerais, incluindo mobiliário, interiores, utilizados em ambiente seco.

Placa tipo OSB/ 1	Norma e Unidade		Requisitos		
			Espessura do painel (mm).		
			6 a 10	> 10 e < 18	18 a 25
MOR Direção longitudinal	EN 310	MPa	20	18	16
MOR Direção transversal	EN 310	MPa	10	9	8
MOE Direção longitudinal	EN 310	MPa	2500	2500	2500
MOE Direção transversal	EN 310	MPa	1200	1200	1200
Adesão interna	EN 319	MPa	0,30	0,28	0,26
Inchamento em espessura (24h)	EN 317	%	25	25	25

Fonte: EN300/2002

Tabela 21 - Painéis para fins estruturais utilizados em ambiente seco - requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento.

Placa tipo OSB/ 2	Norma e Unidade		Requisitos		
			Espessura do painel (mm).		
			6 a 10	> 10 e < 18	18 a 25
MOR Direção longitudinal	EN 310	MPa	22	20	18
MOR Direção transversal	EN 310	MPa	11	10	9
MOE Direção longitudinal	EN 310	MPa	3500	3500	3500
MOE Direção transversal	EN 310	MPa	1400	1400	1400
Adesão interna	EN 319	MPa	0,34	0,32	0,30
Inchamento em espessura (24h)	EN 317	%	20	20	20

Fonte: EN300/2002

Tabela 22 - Painéis para fins estruturais utilizados em ambiente úmido - requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento.

Placa tipo OSB/ 3	Norma e Unidade		Requisitos		
			Espessura do painel (mm).		
			6 a 10	> 10 e < 18	18 a 25
MOR Direção longitudinal	EN 310	MPa	22	20	18
MOR Direção transversal	EN 310	MPa	11	10	09
MOE Direção longitudinal	EN 310	MPa	3500	3500	3500
MOE Direção transversal	EN 310	MPa	1400	1400	1400
Adesão interna	EN 319	MPa	0,34	0,32	0,30
Inchamento em espessura (24h)	EN 317	%	15	15	15

Fonte: EN300/2002

Tabela 23 - Painéis para fins estruturais especiais utilizados em ambiente úmido - requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento.

Placa tipo OSB/ 4	Norma e Unidade		Requisitos		
			Espessura do painel (mm).		
			6 a 10	> 10 e < 18	18 a 25
MOR Direção longitudinal	EN 310	MPa	30	28	26
MOR Direção transversal	EN 310	MPa	16	15	14
MOE Direção longitudinal	EN 310	MPa	4800	4800	4800
MOE Direção transversal	EN 310	MPa	1900	1900	1900
Adesão interna	EN 319	MPa	0,50	0,45	0,40
Inchamento em espessura (24h)	EN 317	%	12	12	12

Fonte: EN300/2002