

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

ROMULO HENRIQUE BATISTA MARTINS

**Painel OSB sanduíche com núcleo ondulado de biomassa florestal
residual**

Pirassununga
2021

ROMULO HENRIQUE BATISTA MARTINS

Painel OSB sanduíche com núcleo ondulado de biomassa florestal residual

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais voltados à Agroindústria.

Orientador:
Prof. Dr. Juliano Fiorelli

Pirassununga
2021

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

M386p Martins, Romulo Henrique Batista
Painel OSB sanduíche com núcleo ondulado de
biomassa florestal residual / Romulo Henrique
Batista Martins ; orientador Juliano Fiorelli. --
Pirassununga, 2021.
77 f.

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

1. Material de construção não convencional. 2.
Painéis OSB sanduíche. 3. Resíduo de madeira. 4.
Madeira balsa. 5. Materiais sustentáveis. I.
Fiorelli, Juliano, orient. II. Título.

ROMULO HENRIQUE BATISTA MARTINS

Painel OSB sanduíche com núcleo ondulado de biomassa florestal residual

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais voltados à Agroindústria.

Orientador:
Prof. Dr. Juliano Fiorelli

Data de Aprovação: ____ / ____ / ____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Juliano Fiorelli

Universidade de São Paulo – USP

Presidente da Banca Examinadora

Prof. Dr. Fabricio Moura Dias

Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UNILESTE

Prof.(a) Dr.(a) Lina Bufalino

Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

“Dedico este trabalho a todos(as) aqueles(as) que compartilham do interesse pela pesquisa na área de materiais, em especial os materiais de construção civil, e aos alunos, professores e técnicos envolvidos com o Grupo de Construção e Ambiência – CONSTRAMBI.”

AGRADEDIMENTOS

Ao prof. Dr. Juliano Fiorelli, que sempre com zelo, muito tem me ensinado nesses anos de convivência, contribuindo sobremaneira no meu crescimento na área acadêmica e científica.

Aos meus pais (João Inocêncio Martins e Alzira Reis Batista Martins) e irmãos (Rodolfo César Batista Martins e Rafael Fernando Batista Martins), que sempre apoiaram e incentivaram meus estudos.

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

Aos amigos e professores do Laboratório de Construções e Ambiente (CONSTRAMBI), em especial o Guilherme Henrique Ament Barbirato e o Luiz Eduardo Campos Filho, por toda a parceria e colaboração.

Aos amigos, parentes e familiares antepassados, todos, que sempre estão presentes de alguma forma e contribuindo para que a caminhada seja mais leve e possível.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA-USP), pela oportunidade e infraestrutura para realização deste curso de mestrado.

Ao Laboratório de Construções e Ambiente (CONSTRAMBI), por colocar à disposição a área experimental e infraestrutura.

A Deus, por permitir esta vivência e por me conceder saúde física, mental e espiritual para seguir a minha jornada.

A tudo e todos, fica aqui meus agradecimentos e profunda gratidão!

RESUMO

MARTINS, R. H. B. **Painel OSB sanduíche com núcleo ondulado de biomassa florestal residual**. 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2021.

A demanda atual por materiais de construção que consumam menos energia em sua produção, sejam menos poluentes e constituídos de matérias-primas renováveis tem colocado os painéis OSB (Oriented Strand Board) produzidos a partir de partículas oriundas da biomassa florestal residual aglomeradas com resina à base de óleo de mamona como possibilidade alternativa mais sustentável aos compensados e aglomerados convencionais produzidos comercialmente. Os objetivos deste trabalho foram produzir painéis OSB sanduíche de núcleo tridimensional ondulado e faces planas constituídos de partículas de madeira Balsa residual e matriz orgânica (resina de óleo de mamona), avaliar o desempenho desses painéis com relação às propriedades físicas, mecânicas e térmicas e propor possíveis usos como elemento construtivo. Para isso, foram realizadas em uma primeira fase a caracterização química, física e microestrutural da madeira Balsa com vistas a avaliar o seu potencial para ser utilizada na produção de painéis OSB. Posteriormente, os painéis sanduíche foram produzidos com teor de resina de 13% e densidades variando da seguinte forma: T1 – 650 kg/m³ (faces) e 400 kg/m³ (núcleo); T2 – 650 kg/m³ (faces) e 500 kg/m³ (núcleo). O painel plano (faces) foi avaliado com relação às propriedades físicas (densidade aparente, absorção de água, inchamento em espessura e perfil de densidade) e térmicas (condutividade térmica). Os painéis sanduíche (núcleo + faces) foram submetidos a ensaio mecânico de flexão para avaliação de seu uso como elemento construtivo. Os maiores valores de rigidez à flexão e momento máximo obtidos foram 6,48 x 10⁶ (N.mm²/mm) e 3065 (N.mm/mm), respectivamente, referentes aos painéis do tratamento T2. Os resultados obtidos para os dois tratamentos (T1 e T2) permitem classificá-los como painéis para uso estrutural, de acordo com o documento normativo PS-2-10. O tratamento T1 é indicado como o mais eficiente por apresentar propriedades mecânicas que atendem às recomendações normativas, com menor consumo de matéria-prima e menor densidade.

Palavras-chave: Partículas orientadas. Madeira balsa. Compósitos. Materiais não convencionais. Resina poliuretana de mamona.

ABSTRACT

MARTINS, R.H.B. **OSB sandwich panel with residual forest biomass corrugated core**. 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2021.

The current demand for building materials that consume less energy in their production, are less polluting and consist of renewable raw materials has placed the OSB panels (Oriented Strand Board) produced from particles from residual forest biomass agglomerated with castor oil-based resin as a more sustainable alternative to conventionally produced plywood and agglomerates. The objective of this work was to produce three-dimensional OSB sandwich panels with corrugated core and flat faces made of residual Balsa wood particles and organic matrix (castor oil resin), evaluate the performance of these panels with respect to physical, mechanical and thermal properties and suggests possible uses as a building element. For this, the chemical, physical and microstructural characterization of Balsa wood was carried out in a first phase in order to assess its potential to be used in the production of OSB panels. Subsequently, the sandwich panels were produced with a resin content of 13% and bulk densities varying as follows: T1 - 650 kg/m³ (faces) and 400 kg/m³ (core); T2 - 650 kg/m³ (faces) and 500 kg/m³ (core). The flat panel (faces) was evaluated for physical (bulk density, water absorption, swelling in thickness and density profile) and thermal properties (thermal conductivity). The sandwich panels (core + faces) were subjected to beam flexure testing to assess their use as a building element. The maximum values of bending stiffness and maximum moment obtained were 6.48 x 10⁶ (N.mm²/mm) and 3065 (N.mm/mm), respectively, referring to T2 treatment panels. The results obtained for the two treatments (T1 and T2) allow to be classified as panels for structural uses, according to the normative document PS-2-10. The T1 treatment is indicated as the most efficient treatment because it has mechanical properties that meet the normative recommendations with less consumption of raw materials and lower density.

Keywords: Oriented particles. Balsa wood. Composites. Unconventional materials. Polyurethane castor resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1–Total de artigos publicados com o termo “OSB panel”	15
Figura 2 - Total de artigos publicados com o termo “OSB waste”	16
Figura 3–Total de artigos publicados com o termo “OSB panel + Balsa wood”	17
Figura 4 – a) árvore de madeira Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>) e b) tora de madeira de Pau-de-Balsa	21
Figura 5 - reação de polimerização de poliuretanos (diisocianato + polioliol)	23
Figura 6 - Camadas de partículas orientadas (face-miolo-face) em painel OSB	24
Figura 7 - Estrutura típica de um compósito sanduíche	30
Figura 8 - Diferentes tipos de núcleo: (a) espuma; (b) hexagonal; (c) corrugado; e (d) trapezoidal	30
Figura 9 - Exemplo de construção utilizando painéis do tipo SIP	31
Figura 10 - Painel OSB com núcleo corrugado em ensaio de flexão	32
Figura 11 - a) Vista lateral do painel sanduíche; b) vista inferior do núcleo corrugado.....	33
Figura 12 - Painel de partículas de bagaço de cana tridimensional com núcleo trapezoidal	34
Figura 13 - Estrutura sanduíche e viga de seção I	35
Figura 14 - Ilustração do “efeito sanduíche”	36
Figura 15 - Estrutura (viga) sanduíche simplesmente apoiada com seção AA representada à direita	36
Figura 16 – Fluxograma das etapas da pesquisa	39
Figura 17 – Molde para a produção dos painéis ondulados. a) Geometria ondulada do molde (inferior e superior), b) Colchão de partículas a ser prensado e c) perfil do molde produzido	43
Figura 18 – Desenho esquemático do molde. a) Perspectiva isométrica da parte inferior e superior e b) Perfil transversal da parte inferior	44
Figura 19 – Esquema de corte e retirada dos corpos-de-prova (longitudinal e transversal) dos painéis	46
Figura 20 – Processo de produção dos painéis OSB planos. a) mistura das partículas com a resina por aspersão, b) disposição das camadas do painel antes da prensagem, c) prensagem do painel plano e d) painel plano após prensagem (conformação)	47

Figura 21 – Produção do painel ondulado. a) colchão de partículas antes da prensagem, b) conformação (prensagem) do painel OSB ondulado, c) painel conformado após a compressão e d) perfil do painel	48
Figura 22 – Procedimento de colagem das faces planas com o núcleo ondulado com auxílio de prensa manual	49
Figura 23 – Densitômetro de Raio X	52
Figura 24 – Ensaio térmico: (a) máquina de ensaio; (b) corpo de prova recoberto com pasta térmica; (c) corpo de prova em ensaio	53
Figura 25 – Corte transversal de partícula de madeira Balsa residual com imagens ampliadas de (a) 100x; (b) 200x; (c) 500x; e (d) 1000x	57
Figura 26 – Perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis das faces (2D e 3D)	62
Figura 27 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de flexão. a) início de ruptura por cisalhamento na linha de cola (amostra longitudinal), b) cisalhamento da interface núcleo-face inferior e início de ruptura do núcleo, c) amostra transversal com ruptura no apoio e no ponto de aplicação da carga e d) detalhe da ruptura no apoio	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Razão de compactação de acordo com a espécie e densidade do painel comercial	27
Tabela 2 – Plano Experimental (descrição dos tratamentos) e quantidade de painéis sanduíche produzidos por tratamento	45
Tabela 3 – Composição química das partículas de madeira balsa e resíduos agroindustriais	55
Tabela 4 – Densidade real e aparente das partículas de madeira balsa e outros resíduos agroindustriais	56
Tabela 5 – Valores experimentais de propriedades físicas dos painéis planos – faces e presentes na literatura	60
Tabela 6 – Valores médios para densidade (massa específica) das camadas externas, central e média do painel das faces	61
Tabela 7 – Valor médio de condutividade térmica obtido para o painel das faces e valores indicados pela norma NBR 15220-2:2005.....	63
Tabela 8 - Valores experimentais médios de EI e FbS e apresentados na literatura.....	64
Tabela 9 – EI e FbS experimentais e estabelecido pelo PS-2-10 (2011)	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CP – Corpo-de-prova

COV – Coeficiente de Variação

DAP – Diâmetro à Altura do Peito.

EI – Rigidez à Flexão

EMIC – Fabricante de máquinas universais de ensaios.

et al. – “e outros”, tradução livre do latim usada para citar artigos escritos por mais de três autores.

FF – Resina fenol-formaldeído.

HDF – High Density Fiberboard.

MDF – Medium Density Fiberboard.

MDI – Adesivo Diisocianato Modificado.

MDP – Medium Density Particleboard.

MEV – Microscopia Eletrônica por Varredura

MPa – Mega Pascal – unidade de medida de tensão.

MOE – Módulo de Elasticidade

MOR – Módulo de Ruptura

OSB – Oriented Strand Board

pH – “Potencial Hidrogeniônico”, uma escala logarítmica que mede o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada solução.

PU-mamona – Resina Poliuretana à base de óleo de mamona.

SIP – Painéis Isolantes Estruturais.

UF – Resina Uréia-formaldeído

T1 – Tratamento 1; T2 – Tratamento 2; T3 – Tratamento 3; T4 – Tratamento 4

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 MADEIRA BALSA.....	20
3.2 ADESIVO.....	22
3.3 PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA.....	23
3.3.1 Painel OSB (Oriented Strand Board).....	24
3.3.1.1 <i>Parâmetros de Produção para Painéis OSB.....</i>	26
3.3.2 Painéis Sanduíche.....	29
3.3.2.1 <i>Painéis Sanduíche de Material Lignocelulósico.....</i>	31
3.3.3 Distribuição de Tensões em Núcleo de Painéis Sanduíche.....	34
3.4 CONSIDERAÇÕES DA REVISÃO.....	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 MATERIAIS.....	38
4.2 MÉTODOS.....	39
4.2.1 Caracterização da madeira Balsa.....	39
4.2.1.1 <i>DENSIDADE REAL DAS PARTÍCULAS.....</i>	40
4.2.1.2 <i>DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA BALSA.....</i>	40
4.2.1.3 <i>DETERMINAÇÃO DO PH.....</i>	40
4.2.1.4 <i>ANÁLISE QUÍMICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA BALSA.....</i>	41
4.2.1.5 <i>CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL (MEV) DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA BALSA.....</i>	41
4.2.2 Concepção e fabricação do molde 3D do núcleo.....	42
4.2.3 Preparo da matéria-prima.....	44
4.2.4 Produção dos painéis planos e 3D.....	44
4.2.4.1 <i>PROCESSAMENTO (CONFORMAÇÃO) DOS PAINÉIS PLANOS E DO NÚCLEO ONDULADO.....</i>	46

4.2.4.2 COLAGEM DOS PAINÉIS PLANOS JUNTO AO NÚCLEO ONDULADO.....	48
4.2.5 Caracterização térmica, física e mecânica dos painéis planos e sanduíche.....	49
4.2.5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS PAINÉIS PLANOS (FACES).....	49
4.2.5.2 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS PAINÉIS PLANOS (FACES).....	52
4.2.5.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PAINÉIS SANDUÍCHE COM NÚCLEO ONDULADO.....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1 PRIMEIRA FASE - CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA Balsa.....	54
5.1.1 Composição química e pH.....	54
5.1.2 Densidade real e aparente da madeira Balsa.....	56
5.1.3 Análise microestrutural.....	57
5.1.4 Considerações parciais da primeira fase.....	59
5.2 SEGUNDA FASE – CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS OSB PLANOS (FACES) E SANDUÍCHE.....	60
5.2.1 Propriedades Físicas (faces).....	60
5.2.1.1 PERFIL DE DENSIDADE.....	61
5.2.2 Propriedades Térmicas (faces).....	62
5.2.3 Propriedades Mecânicas (painel sanduíche)	63
5.2.3.1 ANÁLISE DO MODO DE FALHA DOS CORPOS-DE-PROVA.....	66
5.2.4 Considerações parciais da segunda fase.....	67
6 CONCLUSÕES.....	67
7 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea tem apresentado demanda por materiais de construção que consumam menos energia em sua produção, provoquem menos poluição e sejam produzidos de matérias-primas de fontes renováveis. Nesse sentido, os painéis OSB (*Oriented Strand Board*) constituídos de partículas oriundas da biomassa florestal residual e aglomeradas com resina poliuretana bi componente à base de óleo de mamona (PU-mamona) estão sendo objetos de pesquisa como alternativa mais sustentável aos painéis compensados ou aglomerados convencionais. Eles podem apresentar diferentes configurações e geometria, tais como OSB plano ou sanduiche, com núcleo tridimensional (corrugado ou trapezoidal) e faces planas.

Os painéis de partículas de madeira têm sua origem na Alemanha, durante a segunda guerra mundial, período de escassez de madeira de boa qualidade. Na década de 1960, nos EUA, ocorreu o desenvolvimento de novos tipos de painéis, tais como o Medium Density Particleboards (MDP), Medium Density Fiberboards (MDF) e o OSB.

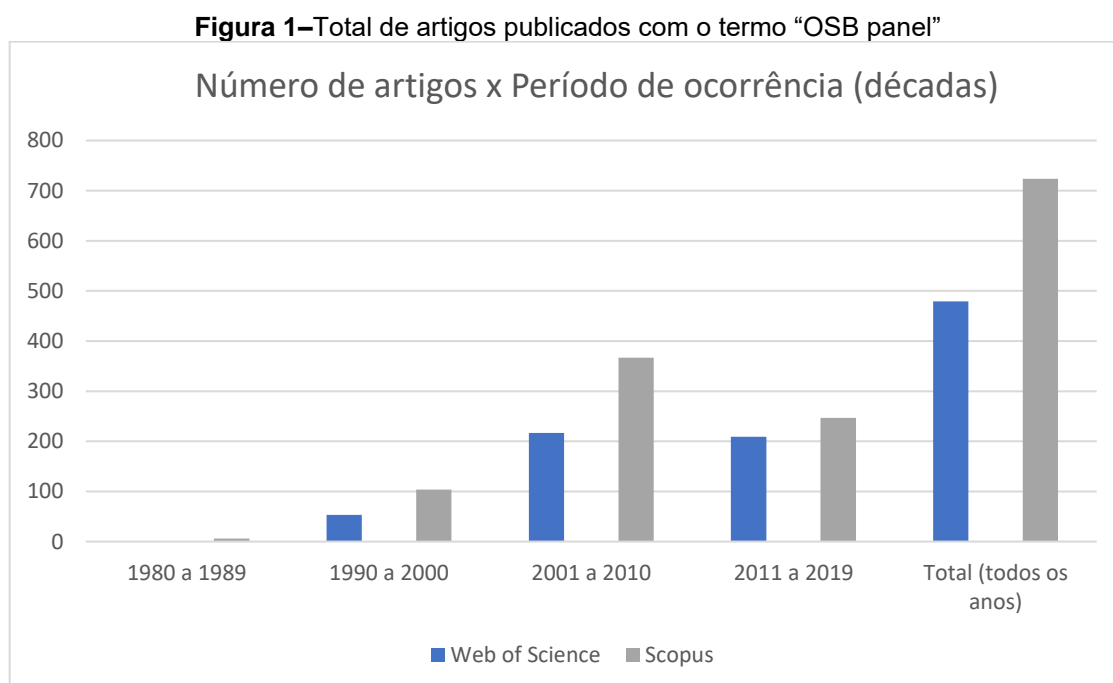
Os resíduos florestais, tais como a madeira, na forma de subprodutos resultantes do desbaste e do processamento das toras na indústria moveleira, naval e aeronáutica representa uma alternativa para a reutilização desse material. No Brasil, assim como em outros países como por exemplo, China e Índia, a utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de painéis de partículas vem sendo explorada industrialmente, o que demonstra a viabilidade de uso desses materiais (RODRIGUES, 2018).

Com o objetivo de levantar informações referentes ao avanço científico do tema painéis de partículas orientadas (OSB) planos e sanduíches (núcleo tridimensionais ou corrugados) e a partir de que momento começaram a surgir pesquisas com madeira Balsa (*Balsa wood*) como matéria-prima e outros tipos de resíduos para a produção desses painéis, foi realizado um levantamento bibliométrico de produções científicas nas bases de dados Web of Science e Scopus, utilizando os seguintes descritores:

1. *OSB panel*;
2. *OSB and waste*;

3. *OSB and Balsa wood*;
4. *OSB and corrugated core*.

Os descritores utilizados na busca deveriam estar presentes no título, resumo ou palavras-chave dos artigos científicos. Foi possível observar neste levantamento que pesquisas científicas abordando painéis OSB (*OSB panel*) começaram a ganhar destaque na década de 1980 e o número de publicações neste período foi de 6 artigos. As publicações se mantiveram crescentes até 2010, havendo uma sensível queda na última década (2011-2019), conforme ilustrado na figura 1.



Fonte: Bases de dados WEB OF SCIENCE e SCOPUS.

Em uma segunda etapa, a busca foi realizada por artigos que abordam o tema painéis OSB produzidos com resíduos, utilizando os descritores “OSB” e “Waste”. Foi possível constatar, a partir dessa análise, que as pesquisas com essa temática ocorreram inicialmente na década de 1990, mais especificamente no ano de 1994, mantendo tendência de crescimento até os dias atuais.

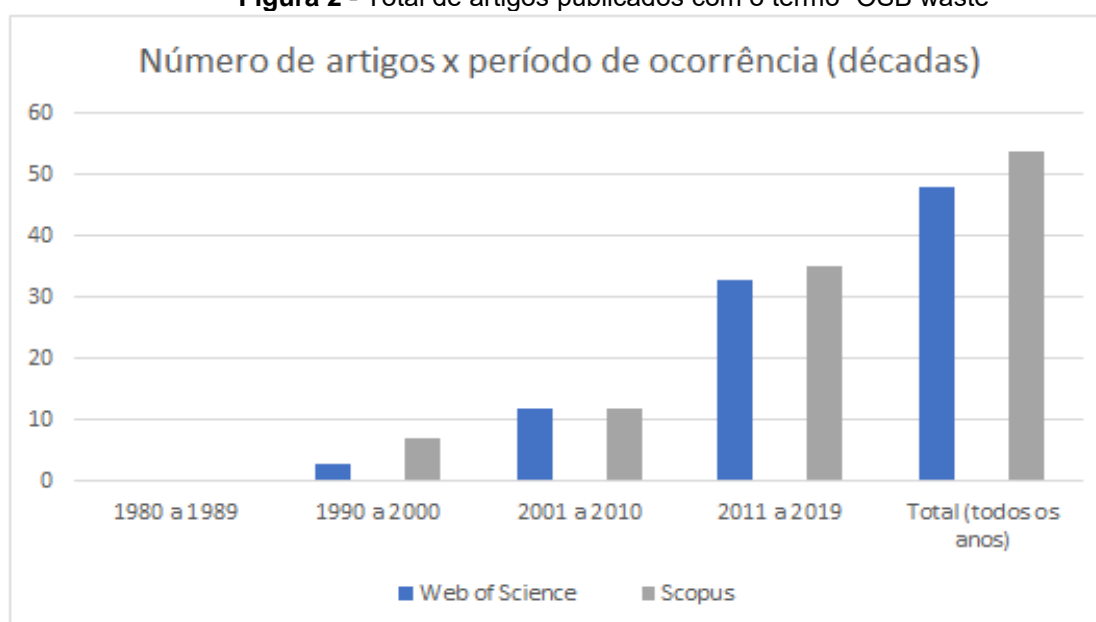
OH et al. (1994) avaliaram a utilização de lignina extraída de papéis de jornal provenientes de resíduos sólidos municipais para a produção de resina. Os painéis OSB foram produzidos com adesivo que apresentava em sua constituição uma substituição parcial (35%) de fenol por lignina, formando uma resina lignina-fenol-formaldeído. Os resultados foram comparados com painéis controle produzidos com

resina fenol-formaldeído, em teores de 3,5 % e 4,5 %, e mostraram que a lignina extraída dos resíduos pode ser utilizada em substituição parcial ao fenol para a produção de painéis OSB.

Nos anos seguintes, em especial a partir dos anos 2000, diversas publicações abordando a utilização de resíduos foram encontradas e abordavam estudos que envolviam inovações e melhorias na utilização de adesivos, tipos de matéria-prima para a produção de painéis e outros parâmetros de produção.

O primeiro artigo nas referidas bases de dados a tratar especificamente sobre a utilização de resíduos de madeira foi o trabalho de Hua et al. (2008) onde os autores avaliaram a utilização de resíduos de painéis folheados de álamo (poplar veneers) como matéria-prima para a produção de painéis OSB. As lascas foram aglomeradas com resina ureia-formaldeído (UF). Os autores obtiveram resultados possibilitando classificar os painéis no tipo OSB/2. A figura 2 mostra o total de trabalhos publicados sobre o tema ao longo dos anos.

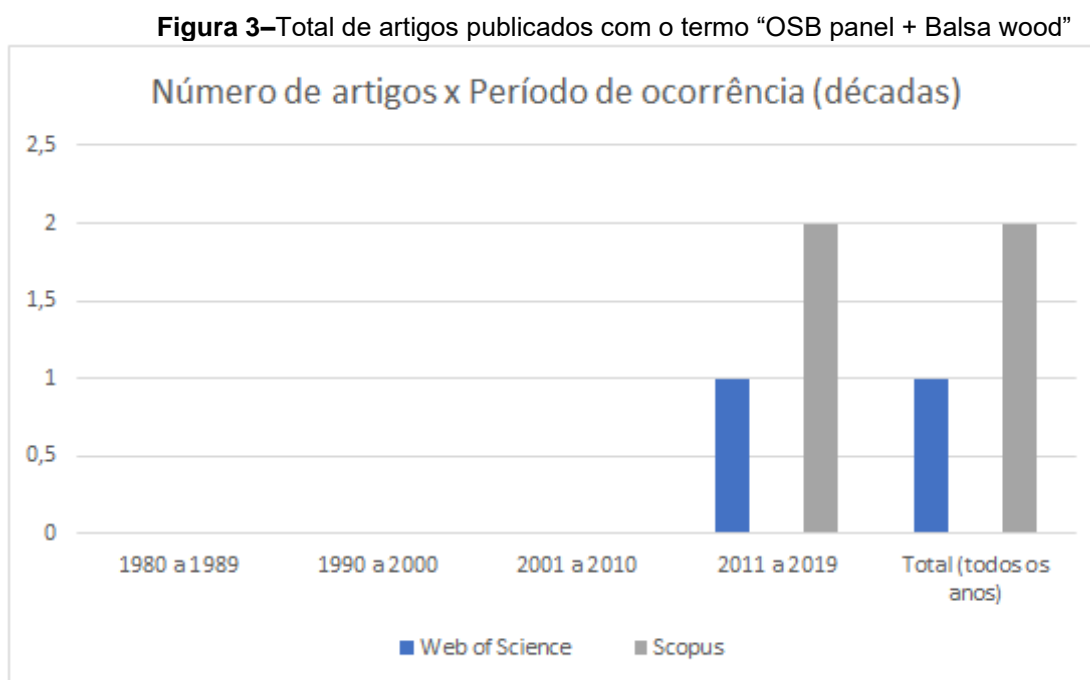
Figura 2 - Total de artigos publicados com o termo “OSB waste”



Fonte: Bases de dados WEB OF SCIENCE e SCOPUS.

Na terceira etapa, a busca foi refinada visando encontrar artigos que tratassem do tema painéis OSB de partículas de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*), utilizando os descritores “OSB” e “Balsa Wood”, em conjunto. O primeiro trabalho encontrado foi de Barbirato et al. (2018) onde os autores avaliaram duas densidades diferentes de painel OSB com madeira Balsa residual e com dois teores

de resina. No ano seguinte, Barbirato et al. (2019) estudou o desempenho mecânico de painéis OSB com madeira Balsa residual com três densidades diferentes e dois teores de resina, a partir de ensaios de baixa velocidade de impacto, flexão estática 4 pontos e profilometria. A evolução das pesquisas utilizando esta temática é mostrada na figura 3.



A quarta etapa da busca, onde foram utilizados os descritores “OSB” e “corrugated core”, com o intuito de buscar publicações referente a painéis OSB com núcleo corrugado, reportou dois resultados de artigos nas referidas bases de dados: Voth et al. (2015) e Denes et al. (2017).

No primeiro artigo encontrado, Voth et al. (2015) avaliaram as propriedades mecânicas de painéis sanduíche com núcleo corrugado produzidos com partículas orientadas de madeira nas faces e núcleo composto de tiras de jornais triturados. Denes et al. (2017) estudaram o comportamento de painéis com perfis ondulado (núcleo corrugado) fabricados com resíduos de madeira folheada (veneer) para travamento de sistemas de vigas de madeira.

A partir deste levantamento fica evidenciado o ineditismo do objetivo deste trabalho e os resultados poderão contribuir com o campo do conhecimento de maneira incremental.

Neste sentido, essa pesquisa teve como hipótese: “é possível produzir painéis sanduíche, com núcleo ondulado e faces planas, constituído de partículas de madeira Balsa residual (*Ochroma pyramidale*) e aglomeradas com resina PU-mamona que atendam as diretrizes normativas para aplicação na construção civil”.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de painéis OSB sanduíche, com núcleo ondulado e faces planas, constituído de partículas de madeira Balsa residual (*Ochroma pyramidale*) e aglomeradas com resina PU-mamona com viés de aplicação na construção civil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Avaliar o potencial da madeira Balsa residual como matéria-prima para a produção de painéis OSB;
- 2) Avaliar o desempenho térmico, físico e mecânico de painéis OSB sanduíche com núcleo ondulado (densidades 400 e 500 kg/m³) e faces planas de densidade 650 kg/m³, constituídos de partículas de madeira Balsa residual e aglomeradas com resina PU-mamona;
- 3) Propor possíveis usos como elemento construtivo com base em indicações do documento PS-2-10 (APA – The Engineered Wood Association) – *Performance Standard for Wood-Based Structural-Use Panels*.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este item apresenta informações extraídas da literatura concernentes ao tema deste trabalho de pesquisa tais como madeira Balsa, painéis de partículas de madeira, painel OSB de núcleo corrugado, parâmetros de produção desses painéis contextualizando o estado da arte que permeia esse campo do conhecimento.

3.1 MADEIRA BALSA

A espécie *Ochroma pyramidale*, conhecida por Pau-de-Balsa, é uma árvore pertencente à família das *Malvaceae*, nativa da América Central e com ocorrência natural no Brasil nos estados de Amazonas, Acre e Pará.

A espécie, de crescimento rápido, alcança 18 a 25 m de altura e 50 cm de DAP (diâmetro à altura do peito) em, aproximadamente, sete anos. Possui fuste reto, cilíndrico e livre de ramos até 15 m de altura ou mais, sendo a copa aberta (Figura 4a). Possui casca lisa, acinzentada, mosqueada de branco a pardo (FINGER et al., 2012).

A árvore Pau-de-balsa possui tecido lenhoso de baixa densidade e, conseqüentemente, uma madeira extremamente leve (Figura 4b). Por seu ritmo acelerado de crescimento e boa tolerância à luz solar direta, tem sido utilizada na recomposição de áreas degradadas de florestas naturais (LORENZI, 1992). Sua maciez, homogeneidade e boa trabalhabilidade lhe confere características adequadas para serem utilizadas em aeromodelismo, construção de barcos, boias e coletes salvavidas em substituição à cortiça (LOUREIRO et al., 1979) bem como outras aplicações comerciais.

Figura 4 – a) árvore de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) e b) tora de madeira de Pau-de-Balsa



(a)

(b)

Fonte: (BARBIRATO, 2018) e (BALSABAUM, 2014).

Autores como Finger et al. (2012) indicam que a densidade da madeira Balsa varia de 146 kg/m^3 a 172 kg/m^3 . Para efeito de comparação o *Pinus taeda*, por exemplo, apresenta densidade média variando de 311 kg/m^3 a 366 kg/m^3 (HIGA et al., 1973). A Balsa apresenta valores de resistência mecânica que se equipara a de algumas resinas (epóxi, poliéster, Teflon) e até mesmo com o cimento, com valores de densidade aparente consideravelmente menores (HELLMEISTER, 2018; CALLISTER, 2006).

O mercado mundial comercializou, em 2008, em torno de 150 mil m^3 de madeira e produtos semiacabados de pau-de-balsa, movimentando em torno de US\$ 71 milhões (SANTIN, 2018; MIDGLEY et al., 2010). Os principais compradores são os Estados Unidos, China e Índia. O grande exportador dessa matéria-prima é o Equador. Estima-se que, na indústria de processamento de madeira (produção de lâminas e compensados), há uma produção de resíduos sólidos da ordem de 50% do volume total das toras que lhe deram origem (HILLIG et al., 2009; RADIOBRÁS, 1997).

No Brasil, existem diversas regiões com condições para o plantio desta espécie (SEDER, 2011). No estado do Mato Grosso, houve um incentivo ao cultivo da madeira Balsa. Em 2012, o estado possuía cerca de 7 mil hectares de área plantada (COPROMAB, 2012).

3.2 ADESIVO

A resina ou adesivo desempenha papel fundamental na constituição dos painéis de partículas e também de seu subgrupo OSB (Oriented Strand Board) por se tratar do aglomerante responsável pela união entre as partículas e solidez da estrutura. Para Weber (2011) a escolha do tipo e quantidade de resina para produção de painéis são parâmetros importantes pois, elas apresentam relação direta com as ligações entre as superfícies das partículas, propriedades mecânicas e estabilidade do painel.

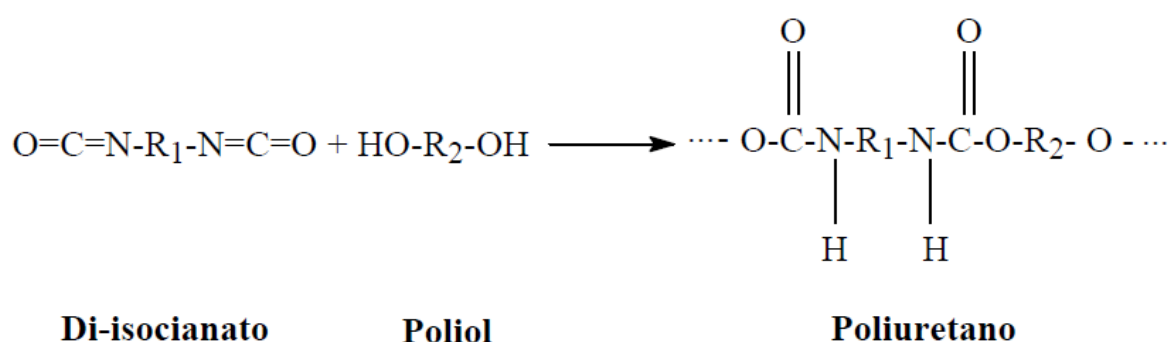
Polímeros orgânicos naturais ou sintéticos são os principais compostos químicos utilizados na produção de adesivos (CORTEZ-BARBOSA et al., 2015). Atualmente, a emissão de gás tóxico durante o processo de produção dos painéis, oriundos da cura das resinas ureia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (FF) vem despertando atenção no meio industrial. Este gás é incolor, com forte odor e alta reatividade química (HELLMEISTER, 2018), além disso, provoca irritação nos olhos, na pele e no trato respiratório (IWAKIRI, 2005; KHODER et al., 2000).

Neste contexto, as resinas poliuretanas surgiram como alternativas menos poluentes às resinas à base de formol, em especial as poliuretanas derivadas de vegetais tais como a PU-mamona (resina poliuretana bi componente à base de óleo de mamona). O Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, desenvolveu o primeiro adesivo bi componente a base de óleo de mamona no Brasil no início dos anos 1980. O óleo de mamona é extraído da semente da planta *Ricinus communis*, encontrada em regiões tropicais e subtropicais, sendo muito abundante no Brasil. É um líquido viscoso (poliol), obtido pela compressão das sementes ou por extração com solvente. A partir do óleo da mamona ocorre a síntese do poliol e do pré-polímero, que dá origem ao poliuretano (PLURAL, 2015).

A reação de polimerização destes componentes ocorre após sua mistura, onde se pode variar a porcentagem dos mesmos, definindo durezas diferentes para o produto final. Podem também ser empregados catalisadores de forma a acelerar a velocidade de polimerização (DIAS, 2005). Entre as principais vantagens da resina PU-mamona, estão: manipulação em temperatura ambiente, grande resistência à água e raios ultravioleta, grande resistência mecânica e ser oriunda de uma fonte renovável, cuja matéria-prima (mamona) é facilmente encontrada em todo território nacional (JESUS, 2000).

A resina poliuretana bi componente a base de óleo de mamona é composta por dois componentes, o polioli derivado do óleo vegetal e o isocianato poli funcional, de cura a frio, e misturados na proporção 1:1 (BELLINI et al., 2014; NAKANISHI, 2018). A figura 5 apresenta a reação de polimerização da resina poliuretana derivada de compostos de origem vegetal. A polimerização dos poliuretanos ocorre quando um composto com dois ou mais isocianatos reage com um polioli (DA SILVA, 2003; CANGEMI, 2006).

Figura 5 – reação de polimerização de poliuretanos (diisocianato + polioli)



Fonte: (CANGEMI, 2006).

Após a mistura dos dois componentes sua viscosidade começa a aumentar e seu tempo de aplicabilidade é de, aproximadamente, 20 min. Seu processo de cura pode ser acelerado com a ação de temperatura, variando de 60 a 90°C (DIAS, 2005).

3.3 PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA

Os painéis de madeira são constituídos de madeira na forma de lâminas, sarrafos, partículas e fibras, obtidos a partir da redução da madeira sólida, aglomerada por meio de ligação adesiva (IWAKIRI, 2005). Dentre esses tipos de painéis há os compensados (laminados e sarrafeados), os painéis de fibras (MDF e HDF) e os painéis de partículas (MDP e OSB) (HELLMEISTER, 2018).

Segundo Bonduelle e Iwakiri (2006), em média 48% da tora da madeira é aproveitada na produção de painéis compensados. Para a fabricação dos compensados, é necessário o arredondamento das toras para possibilitar a delaminação, processo esse que já despreza cerca de 35% do volume da tora processada. As perdas relativas ao rolo resto, em torno de 13%, estão relacionadas

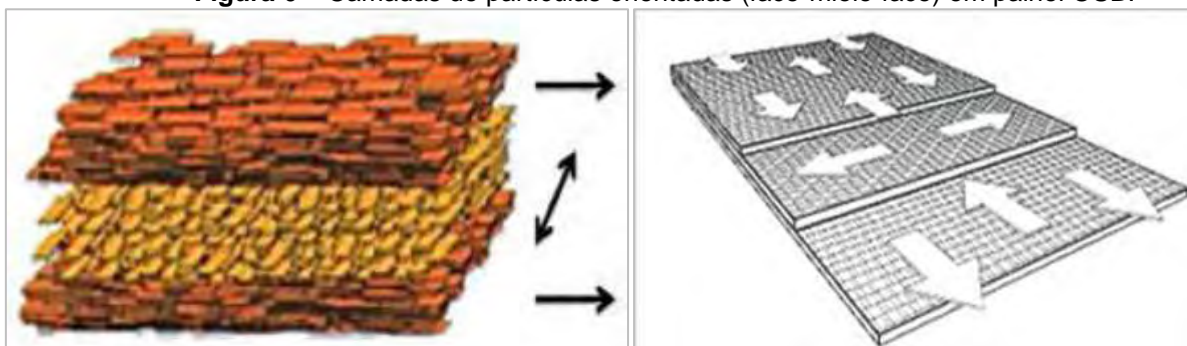
principalmente à qualidade das toras e tipo de equipamento utilizado para laminação. Portanto, cerca de 50% de toda a madeira utilizada na fabricação de compensados é descartada, na forma de resíduo.

A utilização 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, possibilidade de uso de toras de qualidade inferior e, também, ao fato da largura e comprimento dos painéis OSB serem determinados pela tecnologia disponível de produção e não em função do comprimento da madeira de desdobra, como ocorre com os compensados (CLOUTIER, 1998).

3.3.1 Painel OSB (Oriented Strand Board)

O OSB é um tipo de painel de partículas de madeira orientadas, finas e longas (*strands*), consolidadas pelo uso de resinas, calor e pressão (BORTOLETTO JÚNIOR & GARCIA, 2004). São painéis formados por três camadas de partículas, sendo que as duas camadas externas são paralelas e possuem direção perpendicular em relação à da camada intermediária (TSOUMIS, 1991). A figura 6 ilustra este tipo de orientação e formação característica dos painéis OSB.

Figura 6 – Camadas de partículas orientadas (face-miolo-face) em painel OSB.



Fonte: (SILVA, 2006; VIRTUHAB, 2017). Adaptado pelo autor.

O painel OSB é um produto que pode ser utilizado na construção civil para fins estruturais tais como forros, pisos e divisórias, componentes de viga, estrutura de móveis, embalagens, entre outros. Requer madeira de qualidade inferior em comparação com a exigida para produção de painéis compensados. Os painéis OSB podem ser produzidos a partir de madeiras provenientes de desbastes, de troncos

finos e tortuosos, galhadas, bem como de espécies de menor valor comercial (JANSSENS, 1998).

Sendo assim, competem com os compensados, que requerem toras de alta qualidade para a sua manufatura e, por isso, são de custo relativamente superior (BORTOLETTO JÚNIOR & GARCIA, 2004).

Segundo Maloney (1993) nos painéis OSB a geometria das partículas “strands” que apresenta maior relação comprimento/largura, a orientação dessas partículas e a conformação em três camadas cruzadas (face – centro – face) conferem a esses painéis maior resistência à flexão estática e maior estabilidade dimensional.

Silva (2006) avaliou a viabilidade técnica de utilização de partículas longas e orientadas de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de painéis OSB aglomerados com resina poliuretana à base de óleo de mamona (10 e 20%). Os painéis atenderam os requisitos da norma EN 300:2002 – *Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications* para as diferentes faixas de aplicações do produto sugeridas. No entanto, é importante considerar que os painéis de bagaço de cana com 10% de resina obtiveram melhor desempenho.

Iwakiri et al. (2009) avaliou a influência da espessura das partículas tipo “strand” e da inclusão de reforço laminar, nas propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB de *Pinus taeda* L. Os autores produziram painéis com densidade média 650 kg/m^3 , partículas distribuídas nas camadas face/miolo/face na proporção 25:50:25 e com espessura de partículas de 0,4, 0,7 e 1,0 mm. Os resultados obtidos pelos autores para MOR e MOE para os painéis com diferentes espessuras de partículas (0,4, 0,7 e 1,0 mm) foram 34,0; 43,6 e 31,5 MPa e 5566, 5952 e 5129 MPa, respectivamente e de adesão interna os valores médios foram 0,25; 0,39 e 0,52 MPa. Os autores concluíram que o aumento na espessura das partículas resultou em menores valores de MOE e MOR, porém maiores valores na adesão interna e a inclusão do reforço laminar nas faces melhorou significativamente o MOR e MOE na flexão estática no sentido perpendicular.

Souza (2012) produziu e avaliou o desempenho de painéis OSB confeccionados com *Pinus spp.* com inclusão de telas metálicas para aumento da resistência e rigidez na flexão estática. Foi utilizado um teor de resina PU-mamona de 12% e proporção de massa de matéria-prima para as camadas face/miolo/face de 20:60:20. Os resultados apontaram desempenho superior dos painéis OSB em estudo quando comparado com as recomendações normativas e com pesquisas que

avaliaram painéis desta natureza. Porém, a utilização da tela metálica não proporcionou ganhos significativos de propriedades mecânicas.

Os autores Bufalino et al. (2015) avaliaram a viabilidade de utilizar madeiras *Toona ciliata*, *Eucalyptus grandis/urophylla* e *Pinus oocarpa* na produção de painéis OSB. Foi utilizado adesivo fenol-formaldeído (FF) na proporção de 9% para todos os tratamentos. A proporção de massa adotada foi de 25/50/25% para as camadas face/miolo/face dos painéis. A maioria dos painéis OSB não atingiram os valores mínimos de propriedades físicas e mecânicas especificados pela norma EN 300:2002. Os painéis OSB de *Eucalyptus grandis/urophylla* e *Pinus oocarpa* têm potencial para serem comercializados como OSB tipo 1 (utilizados para interiores, mobiliário e ambiente seco) e OSB tipo 2 (utilizado para fins estruturais e ambiente seco). Já os painéis produzidos com *T. ciliata* na face e *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 poliuretana à base de óleo de mamona. Foram avaliados três teores de resina (8%, 10% e 12%). Os painéis apresentaram propriedades físicas e mecânicas superiores às estabelecidas nos documentos normativos nacionais e internacionais. Como conclusão, os autores destacam que os painéis produzidos com 8% de resina são mais vantajosos por apresentarem melhor desempenho e serem moldados com menor quantidade de adesivo.

Barbirato et al. (2018) avaliaram o desempenho de painéis OSB de partículas de madeira Balsa residual aglomeradas com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona. Painéis com densidade de 300 kg/m³ e 400 kg/m³ foram produzidos e o teor de resina foi de 11% e 15%. Os painéis com 400 kg/m³ de densidade e 15 % de resina apresentaram propriedades físicas e mecânicas superiores ao mínimo estabelecido pela norma EN 300:2002 para OSB do tipo 1 – painéis para uso interno, não estrutural e em condições sem umidade.

3.3.1.1 Parâmetros de Produção para Painéis OSB

- **Razão de Compactação**

A razão de compactação é a relação entre a densidade aparente do painel e a densidade aparente da madeira e exerce influência significativa nas propriedades dos painéis de partículas (MOSLEMI, 1974 apud SURDI, 2012).

Em função de maiores valores de razão de compactação, painéis de mesma densidade nominal produzidos com madeira de baixa densidade atingem maiores valores de propriedades mecânicas. Há também um aumento nas propriedades físicas de absorção de água e inchamento em espessura nestes casos (KELLY, 1977 apud SURDI, 2012).

Segundo Maloney (1977) e Iwakiri (2005) o valor de razão de compactação mínimo para que ocorra a compactação do colchão de partículas necessária para a formação de painel com densidade média é de 1,3. Nesta condição, haverá suficiente área de contato entre as partículas durante o ciclo de prensagem.

A razão de compactação está diretamente relacionada com o grau de densificação do painel e, por isso, exerce influência nas propriedades físicas e mecânicas deste (MALONEY, 1993). Para Vila Zegarra (2011), os painéis OSB produzidos com madeira de menor densidade tendem a apresentar maior resistência à flexão e adesão interna entre as partículas quando comparados com painéis produzidos com madeira de alta densidade. A explicação está no fato de que os painéis produzidos com madeira de menor densidade apresentam maior razão de compactação.

A Tabela 1 apresenta valores de razão de compactação para painéis produzidos com alguns tipos de madeira comercialmente utilizadas (IWAKIRI et al., 2004). Nota-se que a razão de compactação é menor para madeiras mais densas.

Tabela 1 – Razão de compactação de acordo com a espécie e densidade do painel comercial

Espécies	Densidade da madeira (g/cm ³)	Densidade da chapa (g/cm ³)	Razão de compactação
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,61	0,69	1,13
<i>Eucalyptus dunnii</i>	0,78	0,68	0,87
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0,81	0,69	0,85
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,73	0,71	0,97
<i>Eucalyptus citriodora</i>	0,77	0,68	0,88
<i>Eucalyptus maculata</i>	0,76	0,70	0,92
<i>Pinus taeda</i>	0,46	0,67	1,46

Fonte: (IWAKIRI et al., 2004).

Recomenda-se uma razão de compactação no intervalo de 1,3-1,6 para uma adequada densificação e consolidação do painel de partículas (KELLY, 1977; TSOUMIS, 1991; MALONEY, 1993 apud VILA ZEGARRA, 2011).

- **Geometria das Partículas**

A geração das partículas é considerada uma das mais importantes etapas do processo de fabricação de painéis OSB. As partículas (strands) devem ser produzidas com dimensões aproximadas de 25 mm de largura, 90 a 150 mm de comprimento e 0,50 a 0,75 mm de espessura (IWAKIRI, 2005).

Segundo Maloney (1993) propriedades como a resistência à flexão, resistência à tração paralela e perpendicular à superfície e o arrancamento de parafusos e pregos são influenciadas diretamente pelo tamanho das partículas. A absorção de água e inchamento também são influenciadas pelo tamanho das partículas, causando alteração na estabilidade dimensional e modificações na superfície dos painéis.

Partículas longas e finas resultam em maior índice de esbeltez e produzem painéis com maior resistência à flexão e maior estabilidade dimensional (VITAL, 1973). Iwakiri (2005) complementou que o índice de esbeltez além de influenciar as propriedades mecânicas e dimensionais, exerce influência sobre a qualidade de acabamento e potencial de conformação do painel.

No que tange exclusivamente ao tamanho das partículas, Moslemi (1974) e Maloney (1993) afirmaram que partículas de tamanhos menores apresentam maior área superficial e, por isso, requerem maiores quantidades de resina. Por outro lado, partículas maiores apresentam menor área superficial e, conseqüentemente, menor será o consumo de resina para fabricação do painel.

A obtenção das partículas do tipo “strands” (lascas) é feita com o uso de picadores ou moinhos do tipo “cilindro” ou “disco”.

- **Parâmetros Normativos para a Produção de Painéis OSB**

Painéis Planos:

A norma europeia EN 300:2002 - Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB) – Definições, classificação e especificações determina os

requisitos de valores limites para as propriedades mecânicas de resistência à flexão e módulo de elasticidade (transversal e longitudinal), adesão interna e inchamento/absorção após 2 horas e 24 horas.

Esta norma define então quatro tipos de OSB, em função desses valores:

- OSB/1 – Placas para usos gerais e placas para componentes interiores (incluindo mobiliários), utilizadas em ambiente seco;
- OSB/2 – Placas para fins estruturais, utilizadas em ambiente seco;
- OSB/3 – Placas para fins estruturais, utilizadas em ambiente úmido;
- OSB/4 – Placas para fins estruturais especiais, utilizadas em ambiente úmido.

Com isso, há o interesse em desenvolver e produzir um material que supra as qualidades mínimas requeridas pela norma para painéis OSB.

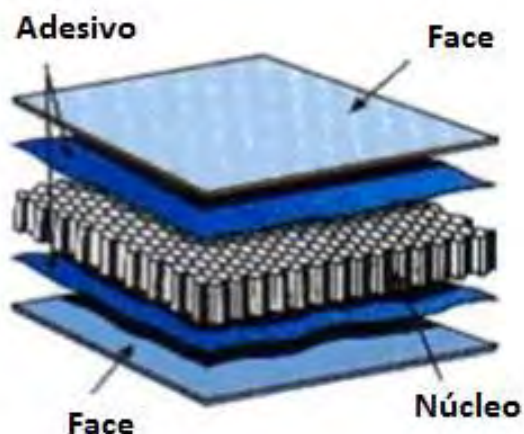
3.3.2 Painéis Sanduíche

No que tange às dimensões e formatos dos painéis, podemos ter painéis planos e sanduíches. Uma estrutura sanduíche é constituída de duas faces de revestimento ligadas a um núcleo. As faces normalmente são finas em relação à espessura total do compósito, mais densas e mais resistentes que o material do núcleo (CARLSSON & KARDOMATEAS, 2011).

Segundo Tita (2007) as faces (chapas) têm a função de suportar as tensões de tração, compressão e cisalhamento na flexão, enquanto o núcleo deve ser rígido o suficiente na direção perpendicular às faces para evitar o esmagamento do painel.

A geometria diferenciada do núcleo de compósitos sanduíche auxilia na redução de peso (com aumento da inércia do elemento construtivo) e isolamento térmico e acústico. Santos (1994) afirma que a existência do núcleo em painéis sanduíche aumenta o momento de inércia (I) da seção transversal por distanciamento das faces, dando estabilidade ao conjunto e dificultando o aparecimento de instabilidades locais. A figura 7 mostra a composição de um painel sanduíche. Geralmente, os núcleos são de baixa densidade e, dependendo do formato, proporciona uma maior eficiência estrutural ao compósito (WAY, 2015).

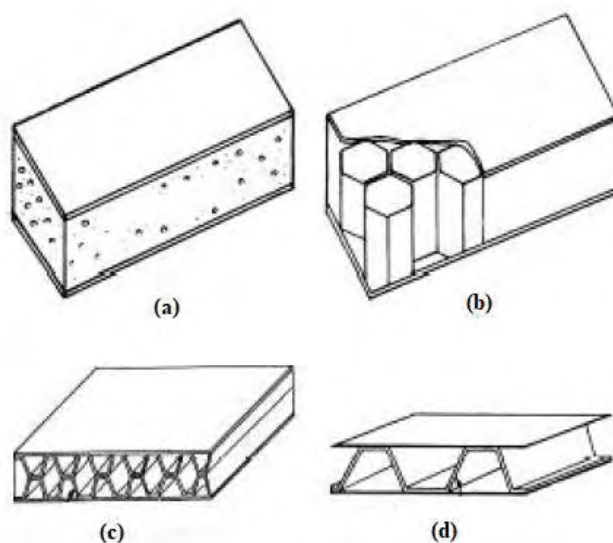
Figura 7 – Estrutura típica de um compósito sanduíche



Fonte: (WAY, 2015).

De acordo com Carlsson e Kardomateas (2011) o núcleo dos painéis sanduíche são classificados em duas grandes categorias: “Celular” e “Estrutural”. Os núcleos “celulares” tem espaços vazios fechados por paredes como, por exemplo, as espumas e hexagonais (favo de mel). Os núcleos “estruturais” consistem em uma trama contínua feita de um material sólido como, por exemplo, as ondulações encontradas em embalagens de papelão. Estes núcleos são geralmente chamados de nervurados, ondulados ou corrugados (formato trapezoidal) (Figura 8).

Figura 8 – Diferentes tipos de núcleo: (a) espuma; (b) hexagonal; (c) corrugado; e (d) trapezoidal



Fonte: (NALLAGULA, 2006).

A utilização de compósitos sanduíche à base de madeira ainda é limitada. Uma exceção é a dos painéis isolantes estruturais (SIPs), que vem ocupando espaço dentro do mercado de materiais de construção ecológicos, combinando isolamento, baixo peso e facilidade de montagem. Segundo Way (2015) e Kermani (2006), consiste em um painel com faces de OSB e núcleo de espuma (geralmente poliestireno expandido). Os SIPs são elementos projetados para substituir os sistemas de Light Steel Frame. Um exemplo da aplicação destes painéis é mostrado na figura 9.

Figura 9 – Exemplo de construção utilizando painéis do tipo SIP



Fonte: (APA, 2013).

Os painéis sanduíche têm comportamento estrutural semelhante às vigas I. O núcleo deve ser espesso em relação à espessura total do compósito sanduíche, permitindo a separação das faces, situando-as o mais longe possível da linha neutra, no sentido de propiciar uma melhor distribuição das tensões internas.

3.3.2.1 Painéis Sanduíche de Material Lignocelulósico

No sentido de buscar novas alternativas para a confecção e utilização de painéis de partículas, procurando-se melhorar sua performance estrutural, vem sendo estudadas novas possibilidades de geometria como, por exemplo, os painéis

tridimensionais, com faces externas planas e núcleo corrugado, alveolar, formando assim uma estrutura mais rígida, resistente e com menor peso específico.

Voth (2009) desenvolveu um modelo de painel sanduíche constituído de chapas OSB de madeira nas faces e núcleo corrugado de tiras de jornais triturado, visando oferecer alternativas aos OSB estruturais convencionais. Os painéis foram produzidos com densidade aparente de 312 kg/m^3 e 8 % de resina fenol-formaldeído (FF). O núcleo foi colado aos painéis planos com adesivo diisocianato modificado (MDI).

Ainda segundo o autor, o formato de núcleo corrugado tem benefícios significativos para a indústria da construção, sendo que as cavidades ocas do núcleo permitem a passagem de condutores elétricos e encanamento, por exemplo. Além disso, este tipo de painel tem potencial para aplicações como pisos, forros, paredes, prateleiras industriais, móveis e sistemas de construção, proporcionando desempenho estrutural e de isolamento térmico e acústico. A figura 10 apresenta o painel desenvolvido por Voth (2009) submetido a um teste de flexão.

Figura 10 – Painel OSB com núcleo corrugado em ensaio de flexão



Fonte: (VOTH, 2009).

White et al. (2015) estudaram as propriedades mecânicas do painel desenvolvido por Voth (2009) avaliando a rigidez na flexão. Concluíram que há uma redução de 40% na quantidade de matéria-prima utilizada e um aumento de aproximadamente 70% na rigidez específica (relação entre o módulo de elasticidade e a densidade do material) quando comparado com painéis OSB planos de mesma espessura.

Way et al. (2016) avaliaram o desempenho estrutural de painéis sanduíche de faces planas OSB e núcleo moldado bidirecional de partículas de madeira (figura 11).

Os resultados indicaram que o design tridimensional promove uma alta resistência e rigidez em relação ao peso específico. Também concluem que os painéis com design tridimensional apresentaram melhor eficiência à flexão quando comparados com painéis planos, no entanto enfatizam que as propriedades de conexão desses painéis devem ser melhor avaliadas em trabalhos futuros.

Figura 11 - a) Vista lateral do painel sanduíche; b) vista inferior do núcleo corrugado



Fonte: (WAY et al., 2016).

Pozzer e Fiorelli (2018) avaliaram o desempenho mecânico de painel sanduíche com núcleo corrugado trapezoidal constituído de partículas de bagaço de cana-de-açúcar aglomeradas com resina poliuretana bi componente à base de óleo de mamona (PU-mamona). Foram produzidos painéis sanduíche com três tratamentos diferentes (T1, T2 e T3), tendo valores de densidades nominais T1 - 750 kg/m³ (face e núcleo); T2 - 400 kg/m³ (face e núcleo); e T3 - 650 e 500 kg/m³ (face e núcleo, respectivamente). As faces planas foram produzidas com espessura de 10 mm e o núcleo corrugado apresentou espessura de 15 mm, para o tratamento (T1). Para demais tratamentos foi utilizada espessuras de 10 mm. Na junção das faces externas com o núcleo, foi utilizado adesivo PU-mamona distribuído de forma homogênea em cada superfície de contato do núcleo corrugado com os painéis planos.

Todos os três tratamentos apresentaram resultados de desempenho mecânico que permitem classificá-los como painéis estruturais e, segundo o documento normativo PS-2-10 da APA (*The Engineered Wood Association*), são

indicados para aplicação como piso. O tratamento T1 apresentou propriedades mecânicas de força máxima, rigidez à flexão, rigidez ao cisalhamento e módulo de cisalhamento superiores aos encontrados na literatura para painéis sanduíche com núcleo corrugado de partículas orientadas de madeira. No entanto, os autores recomendam outras investigações que possibilitem uma maior caracterização do material para ser utilizado na indústria da construção civil. A figura 12 apresenta os painéis corrugados produzidos.

Figura 12 – Painel de partículas de bagaço de cana tridimensional com núcleo trapezoidal

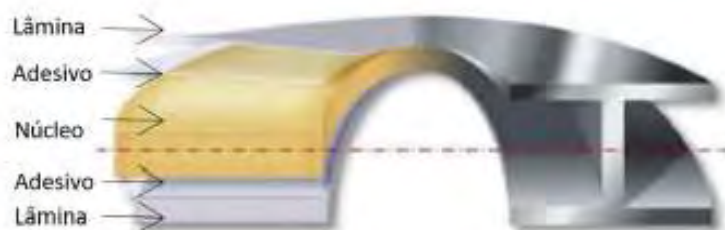


Fonte: (POZZER, 2019).

Portanto, o estado da arte que permeia o campo do conhecimento de painéis de partículas lignocelulósicas em formato sanduíche com núcleo corrugado requer novas pesquisas e investigações por materiais que sejam eficientes do ponto de vista técnico, agregue valor a subprodutos florestais e seja compatível em relação ao custo, contribuindo com a economia circular do setor.

3.3.3 Distribuição de Tensões em Núcleo de Painéis Sanduíche

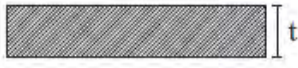


O comportamento estrutural de um painel sanduíche se assemelha a de uma viga de seção transversal I (Figura 13), com as faces do painel desempenhando função estrutural semelhante aos banzos da viga e o núcleo com a mesma função da alma. Assim, a rigidez à flexão (EI) do painel aumenta com o distanciamento das faces, ou seja, com o aumento da espessura do núcleo (maciço ou corrugado), sem elevar significativamente o peso do elemento construtivo (CRUZ, 2017).

Figura 13 – Estrutura sanduíche e viga de seção I

Fonte: (CRUZ, 2017).

O “efeito sanduíche”, que traduz o ganho de eficiência estrutural de um painel devido ao aumento da espessura do núcleo está apresentado na figura 14. O núcleo deve garantir a distância ideal entre as faces e a transferência de esforços, além de possuir rigidez suficiente para resistir ao cisalhamento e ao escorregamento face-núcleo.

Figura 14 – Ilustração do “efeito sanduíche”

			
Peso	~1	~1	~1
Rigidez em flexão	~1	12	48
Resistência à flexão	~1	6	12

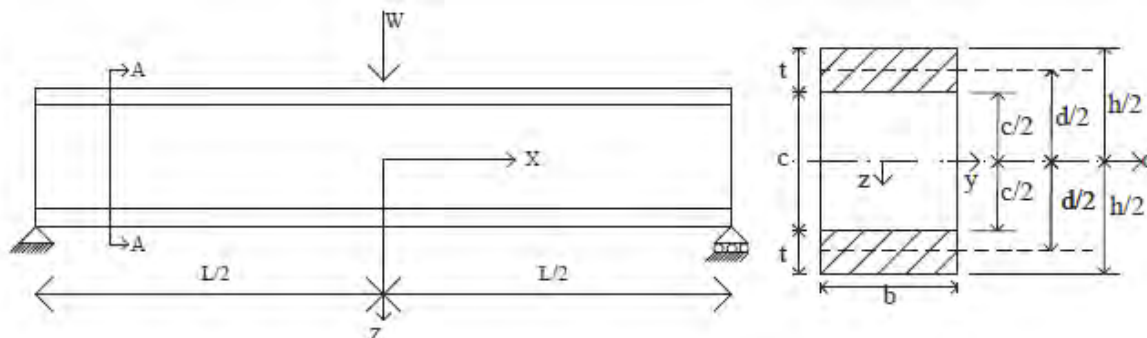
Fonte: (CRUZ, 2017). Adaptado de ZENKERT (2005).

Para análise do comportamento (tensão x deformação) de estruturas do tipo sanduíche, utilizando a teoria clássica da flexão de vigas, deve-se considerar algumas hipóteses, tais como (ALLEN, 2013 apud CRUZ, 2017):

- (i) Camadas face-núcleo intimamente ligadas;
- (ii) Rigidez das faces muito superior à rigidez do núcleo;
- (iii) Faces e núcleos compostos por material isotrópico, embora isso não aconteça para os compósitos de material lignocelulósico;
- (iv) Seção transversal plana e ortogonal ao eixo longitudinal da viga, mesmo quando a viga é fletida.

15. Sendo assim, admite-se a estrutura com seção simétrica presente na Figura

Figura 15 – Estrutura (viga) sanduíche simplesmente apoiada com seção AA representada à direita



Fonte: (CRUZ, 2017). Adaptado de Allen (2013).

• Rigidez à Flexão

A rigidez à flexão é determinada pelo produto do módulo de elasticidade e do momento de inércia. Para uma estrutura sanduíche (heterogênea), a rigidez à flexão é calculada pela equação 3.1 (CRUZ, 2017):

$$D = D_{faces} + D_{núcleo} = E_f x \frac{bt^3}{6} + E_f x \frac{btd^2}{2} + E_c x \frac{bc^3}{12} \quad (3.1)$$

Onde:

E_f - Módulo de elasticidade das faces

E_c - Módulo de elasticidade do núcleo

b - Largura da viga

t - Espessura das faces

c - Espessura do núcleo

d - Distância entre os centros de gravidade das faces.

• Modos de Ruptura

A norma ASTM C393/C393M (2016) estabelece os métodos de teste para determinação das propriedades de cisalhamento do núcleo de painéis sanduíche submetidos a ensaios de flexão de três e quatro pontos. Os modos de falha (ruptura)

que são aceitos nesta norma são os de cisalhamento do núcleo ou de cisalhamento da adesão núcleo-face (região de cola). Falhas na face do painel precedendo falhas de núcleo ou de adesão núcleo-face não são aceitas para essa norma. Para esse tipo de falha, recomenda-se seguir o método preconizado pelo documento D7249/D7249M (tração e compressão nas faces).

Segundo Ferreira (2012) os modos de ruptura para corpos-de-prova de painéis sanduíche são:

- (i) Ruptura das faces devido aos esforços;
- (ii) Ruptura por cisalhamento do núcleo;
- (iii) Ruptura nos apoios.

Ao se analisar um determinado modo de falha, este pode ativar ou interagir com outro tipo, durante o ensaio, compondo uma outra forma distinta ao do início do carregamento e modificando assim as características de comportamento da estrutura (material) até a ruptura.

3.4 CONSIDERAÇÕES DA REVISÃO

A cadeia florestal no Brasil gera cerca de 85 milhões de m³/ano de resíduos de biomassa resultantes das atividades de extrativismo, silvicultura e processamento mecânico da madeira (OLIVEIRA, 2012). Um destes resíduos é a madeira Balsa.

A madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) apresenta baixa densidade (100 kg/m³ a 380 kg/m³), acelerado ritmo de crescimento (18 a 25 m em, aproximadamente, 7 anos), boa tolerância à luz solar direta e propriedades mecânicas comparáveis às de outros materiais utilizados na construção civil. Estima-se que a produção de resíduos industriais desse tipo de madeira foi da ordem de 150 mil m³ no ano de 2008, em termos mundiais.

Existem hoje diferentes tipos ou classes de painéis de madeira reconstituídas disponíveis comercialmente, sendo os painéis de partículas orientadas (OSB) uma dessas categorias que vêm ocupando nichos de mercado antes exclusivos dos painéis compensados.

Nos últimos anos há um apelo ambiental pela busca e utilização de resinas que não sejam prejudiciais ao homem e ao meio ambiente. Neste contexto que a

resina poliuretana bi componente à base de óleo de mamona, oriunda de recursos naturais renováveis (mamona), surgiu como alternativa às resinas comercialmente utilizadas para a produção de painéis de partículas que são à base de formol.

Formas e geometrias diferentes são possíveis para a produção e utilização dos painéis OSB pelos setores da construção civil, indústria moveleira, entre outras.

Há, dentro do campo científico, a falta de informações relativas à utilização de resíduos de materiais lignocelulósicos para a produção de painéis de partículas com núcleo corrugado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item apresenta os materiais e equipamentos que foram utilizados para a execução experimental da pesquisa bem como a metodologia e técnicas que foram empregadas.

4.1 MATERIAIS

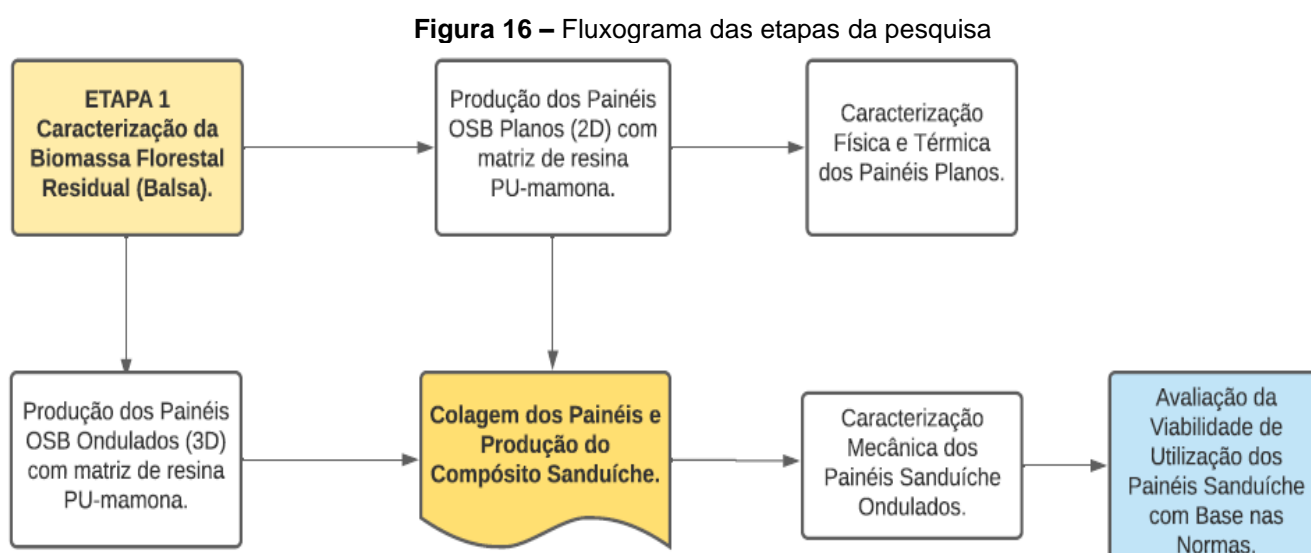
Para a confecção dos painéis de partículas orientadas OSB (faces e núcleo) foram utilizados resíduos de madeira Balsa provenientes de empresa responsável pelo processamento de toras e exportação desse tipo de madeira, situada no interior do estado de São Paulo. Este resíduo, que constitui a matéria-prima principal dos painéis confeccionados, consiste em partes do tronco da árvore de difícil laminação como o fuste e o rolo-resto, assim como eventuais pedaços com casca, constituindo-se, portanto, no material residual deste processo. O rolo-resto é constituído por uma porção jovem da madeira da árvore, localizada na região central de seu fuste ou tronco (VASCONCELOS et al.,2003).

A resina utilizada como aglomerante para aglutinação dos *strands* de madeira foi a poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, do tipo AGT1315, adquirida junto à empresa Imperveg® Poliuretano Vegetal, na qual um dos componentes é o polioliol derivado da mamona e o outro um pré-polímero petrolífero. A mistura desses dois componentes se deu na proporção 1:1 (uma parte de pré-polímero para uma parte de polioliol). Ao serem misturados, esses dois componentes reagem, formando um polímero com elevada resistência mecânica e propriedades semelhantes às de resinas tradicionais como ureia-formaldeído, fenol-formaldeído,

entre outras. Após a mistura, seu tempo de aplicação (e início do processo de cura) é de aproximadamente 20 minutos.

4.2 MÉTODOS

O trabalho experimental foi dividido em duas etapas principais, a se saber: Fase 1 – coleta e caracterização da madeira Balsa residual e Fase 2 – produção e caracterização dos painéis OSB planos e sanduíche com núcleo ondulado. O fluxograma da figura 16 sintetiza as principais etapas previstas na metodologia do trabalho.



Fonte: Própria autoria.

FASE 1 – Coleta e Caracterização da Madeira Balsa

4.2.1 Caracterização da madeira Balsa

Os resíduos de madeira foram coletados e caracterizados com relação às suas propriedades físicas, químicas e microestruturais seguindo a metodologia utilizada por (BARBIRATO et al., 2018). Foi realizado ensaios de densidade real, densidade aparente, pH, análise química (com vistas à verificação dos teores de celulose, hemicelulose e lignina da biomassa residual) e a caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estes ensaios, em conjunto com a literatura disponível a respeito da composição da madeira Balsa e de

outros materiais lignocelulósicos, permite-nos obter subsídios para avaliar o potencial da matéria-prima para ser utilizada como material em painéis de partículas orientadas OSB.

4.2.1.1 DENSIDADE REAL DAS PARTÍCULAS

Para a determinação da densidade real da madeira Balsa foi utilizado um multiplicnômetro a gás hélio e, de uma mesma amostra de madeira em pó, foram realizadas 8 mensurações até atingir desvio de $\pm 0,002$. A densidade real do material é importante parâmetro pois, permite determinar a massa de madeira contida em uma amostra e o volume correspondente ao material sólido desta amostra, o que vai influenciar diretamente nas propriedades físicas e mecânicas do painel.

4.2.1.2 DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA Balsa

A densidade aparente da madeira foi obtida utilizando “pedaços” (cavacos) do resíduo, de dimensões 20x40x50 mm, sendo o comprimento de 50 mm na direção das fibras, pelo método de pesagem em balança, de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997 – *Projeto de estruturas de madeira*. Foram utilizados paquímetro e balança eletrônica tipo AY220. As dimensões e massa dos corpos-de-prova foram aferidas para o cálculo da densidade aparente (massa total dividida pelo volume) do material.

Esta propriedade é importante para a classificação da madeira (leve, média e pesada), influencia diretamente em outras propriedades importantes como a resistência mecânica, por exemplo, além de estar diretamente relacionada com o volume de material a ser utilizado na confecção dos painéis.

4.2.1.3 DETERMINAÇÃO DO pH

Neste procedimento foi utilizado a metodologia descrita por Vital (1973) com algumas modificações. As lascas de madeira foram secas em estufa a $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$, até atingir constância de massa. Foram pesadas amostras contendo 15 g do material e, posteriormente, imersas em água deionizada por três horas, à temperatura de $22 ^\circ\text{C}$. Feito isso, com um pHmetro digital, realizou-se a medição do pH. Foram feitas duas medições no extrato puro. Este ensaio é importante pois o pH da madeira pode

influenciar na interação desta com a resina e, conseqüentemente, na adesividade do material. Os valores de pH para madeiras comumente utilizadas na indústria de painéis situam-se no intervalo de 3 a 6 (IWAKIRI, 2005).

4.2.1.4 ANÁLISE QUÍMICA DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA Balsa

A composição química da matéria-prima que constitui os painéis de partículas do tipo OSB exerce influência em suas propriedades físicas e mecânicas. Para Zhang e Hu (2013) propriedades como a densidade e resistência à tração das fibras de materiais lignocelulósicos estão relacionadas com a composição e estrutura química destas.

Sendo assim, a determinação dos componentes químicos da madeira foi realizada de acordo com a metodologia de análise de fibras vegetais proposta por Van Soest (1994). Este método divide os componentes da planta em celulares (lipídios, compostos nitrogenados, gorduras, amido e outros compostos solúveis em água) e compostos da parede celular (proteína insolúvel, celulose, hemicelulose e lignina) e consiste basicamente em separar os conteúdos celulares dos da parede celular. Isto é feito aquecendo a amostra em uma solução de detergente neutro. O conteúdo celular solubiliza-se no detergente enquanto a parede celular não, permitindo a separação por filtração. As frações resultantes, denominadas de soluções solúveis em detergente neutro, são compostas por proteínas, nitrogênio não proteico (NNP), lipídios, pigmentos, açúcares, ácidos orgânicos, pectina e fibra de detergente neutro (FDN), que é constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. A fibra é então aquecida em detergente ácido, a celulose e hemicelulose solubilizam-se e a lignina ligada à celulose (lignocelulose) é então separada por um processo de filtragem (SALMAN et al., 2010).

4.2.1.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL (MEV) DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA Balsa

Esta análise é importante para verificar o potencial da madeira como matéria-prima para a fabricação de painéis de partículas, uma vez que a porosidade da madeira está diretamente relacionada com a dispersão da resina nas partículas e, conseqüentemente, no interior do painel, além da espessura das paredes fibrilares

estarem relacionadas com a capacidade de compactação do painel, fatores importantes que afetam as propriedades finais dos painéis de madeira reconstituída (BARBIRATO et al., 2018). Sendo assim, a importância da técnica no presente trabalho se dá com vistas à caracterização microestrutural da madeira e, junto com outras análises químicas e físicas, dar subsídios para a avaliação do potencial da matéria-prima para utilização na produção do compósito não-convencional (NOCMAT).

A análise microestrutural da madeira por meio da técnica de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) tem como objetivo identificar a organização e formato das fibras e dos vazios do material (BARBIRATO et al., 2018). As amostras de madeira Balsa, devidamente preparadas, foram submetidas ao teste microestrutural em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Hitachi, modelo Analytical Table Top Microscope TM300. A técnica para obtenção de imagens utilizada foi a de elétrons retroespalhados. O objetivo ao final do ensaio é identificar a anatomia dos poros e espessura da parede das fibras, correlacionando-as com as demais características e propriedades do material. Este equipamento possibilita aumentos da ordem de até 3000x.

FASE 2 – Produção e Caracterização dos painéis OSB Sanduíche com Núcleo Ondulado

4.2.2 Concepção e fabricação do molde 3D do núcleo

Inicialmente foi realizada uma pesquisa de mercado e com as condições disponíveis em termos financeiros e de oferta de materiais na região, chegou-se à configuração de molde utilizado nesta pesquisa. O mesmo é constituído de aço carbono e dividido em duas partes: inferior e superior. A parte inferior é usada para dar apoio ao colchão de partículas (*strands*) e a parte superior é acoplada à prensa para que o colchão seja prensado e conformado. A figura 17 demonstra a geometria do molde metálico (corrugado), o processo de conformação do painel durante fase de teste do molde e o perfil do molde.

Figura 17 – Molde para a produção dos painéis ondulados. a) Geometria ondulada do molde (inferior e superior), b) Colchão de partículas a ser prensado e c) perfil do molde produzido



(a)

(b)

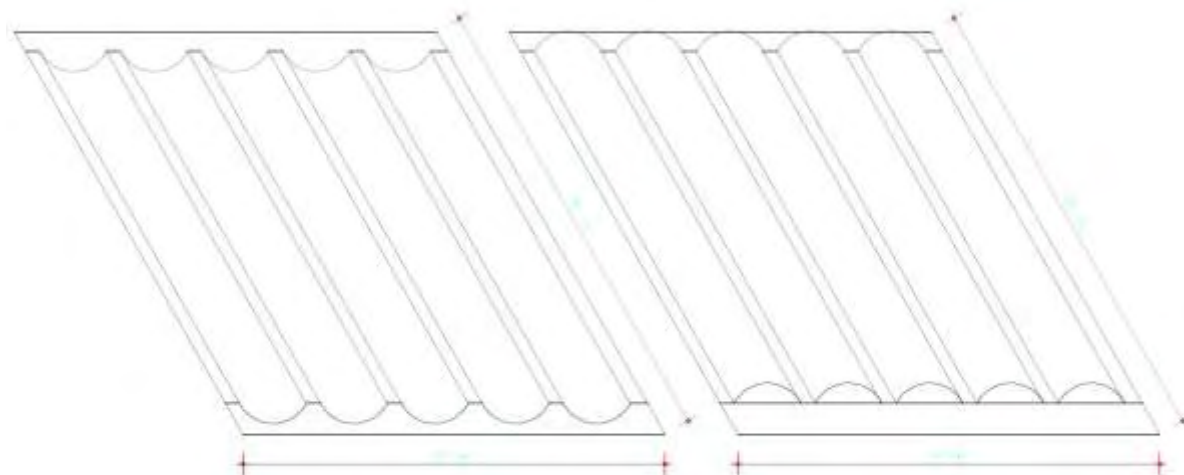


(c)

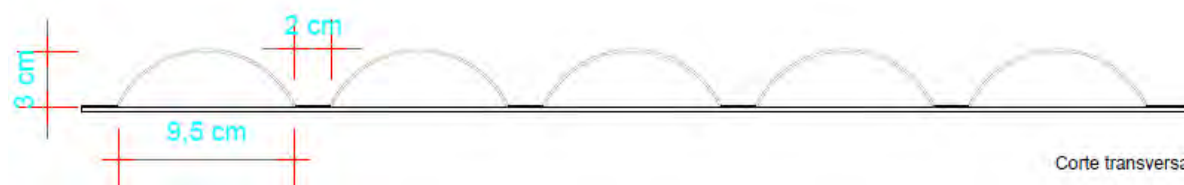
Fonte: Própria autoria.

Um desenho realizado em software AutoCad com a perspectiva, perfil do molde inferior e suas principais dimensões é mostrado na figura 18 abaixo.

Figura 18 – Desenho esquemático do molde. a) Perspectiva isométrica da parte inferior e superior e b) Perfil transversal da parte inferior



(a)



(b)

Corte transversal

Fonte: Própria autoria.

A justificativa técnica para a concepção do uso dessa geometria (formato) do núcleo é que as estruturas do tipo arcadas (arcos contínuos) apresentam comportamento mecânico de transmissão de esforços solicitantes predominantemente por compressão (esforço normal simples) (NUNES, 2009). Segundo Sales et al. (2005), os arcos são como cabos invertidos no qual, ao invés de esforços de tração, são desenvolvidos esforços de compressão ao longo do elemento estrutural. Este fato pode ser benéfico para o ganho de resistência em estruturas do tipo sanduíche, o que é objeto de observação experimental neste estudo. Outro fator importante é que esse tipo de configuração para o núcleo evita o surgimento de vazios na etapa da prensagem (conformação) do painel, como relatado no trabalho de (POZZER et al., 2020) quando utilizado núcleo de formato trapezoidal.

4.2.3 Preparo da matéria-prima

Os resíduos de madeira passaram por um processo de uniformização com serra de fita para adequar os cavacos ao bocal do aparelho gerador de lascas (strands), marca Marconi® tipo MA685, que possui dimensões máximas 9,5cm x 6,5cm (larg. x alt.). Devido às características da máquina e a não uniformidade dos resíduos, as lascas foram produzidas com dimensões de 9,0 cm de comprimento, larguras de 2,5 a 5,0 cm e espessura de aproximadamente 1,0 mm. Após a produção das lascas e peneiramento para remoção dos finos (lascas menores que 9 cm de comprimento), as mesmas foram colocadas em uma estufa pelo período de 48 horas a uma temperatura de 65°C, para se obter uma umidade de aproximadamente 8% e possibilitando, assim, melhor aproveitamento da madeira na produção dos painéis.

4.2.4 Produção dos painéis planos e 3D

Para a produção dos painéis sanduíche com núcleo ondulado foram confeccionados painéis utilizando 13% de resina PU-mamona (faces e núcleo) calculado sobre a massa de partículas, sendo esse o valor otimizado obtido no trabalho de Lopes Júnior (2020) que utilizou três teores de resina PU-mamona diferentes e densidade dos painéis de 650 kg/m³. A densidade aparente nominal dos

painéis planos (faces) do presente estudo foi de 650 kg/m³ e a densidade nominal dos painéis ondulados (núcleo) de 400 e 500 kg/m³, onde foram produzidos 2 painéis sanduíche por tratamento (totalizando 4 painéis). A opção de escolha por menores valores de densidade no núcleo (parte oca) se justifica, pois, o intuito é obter um produto mais leve com propriedades mecânicas que permitam sua aplicação na construção civil. O material do núcleo deve ter rigidez suficiente para evitar o esmagamento e separar as faces do painel sanduíche. Tanto para os painéis planos das faces quanto para o núcleo foi utilizada proporção em massa de partículas de madeira (face: miolo: face) de 30:40:30. A tabela 2 apresenta a descrição de cada tratamento e a quantidade de painéis produzidos (plano experimental). Todos os painéis foram conformados em prensa termo-hidráulica a uma pressão média de 3 MPa, temperatura de 100 °C, durante um período de 10 min. de prensagem. Para todos os painéis foram utilizados limitadores de metal (10 mm).

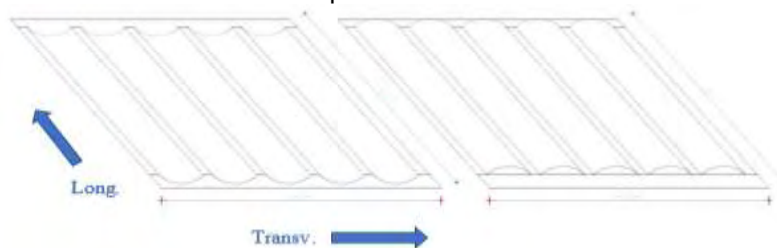
Tabela 2 – Plano Experimental (descrição dos tratamentos) e quantidade de painéis sanduíche produzidos por tratamento

Tratamentos	Faces (kg/m ³)	Núcleo (kg/m ³)	Resina (%)	Número de painéis
T1	650	400	13	2
T2	650	500		

Fonte: Própria autoria.

Foram produzidos dois painéis sanduíche com núcleo ondulado por tratamento. De cada painel foram retirados corpos-de-prova no sentido longitudinal, com relação às células (ondulações) do núcleo, e no sentido transversal, conforme o esquema da figura 19. No total foram obtidos 3 corpos-de-prova em cada sentido (longitudinal e transversal) que foram submetidos ao ensaio de flexão de acordo com os parâmetros da norma ASTM C393 (2016) – *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Construction by Beam Flexure*.

Figura 19 – Esquema de corte e retirada dos corpos-de-prova (longitudinal e transversal) dos painéis



Foram produzidos dois painéis planos excedentes de 650 kg/m³ e 13% de resina PU-mamona para realização dos testes e avaliação dos mesmos com relação às suas características físicas e térmicas.

4.2.4.1 PROCESSAMENTO (CONFORMAÇÃO) DOS PAINÉIS PLANOS E DO NÚCLEO ONDULADO

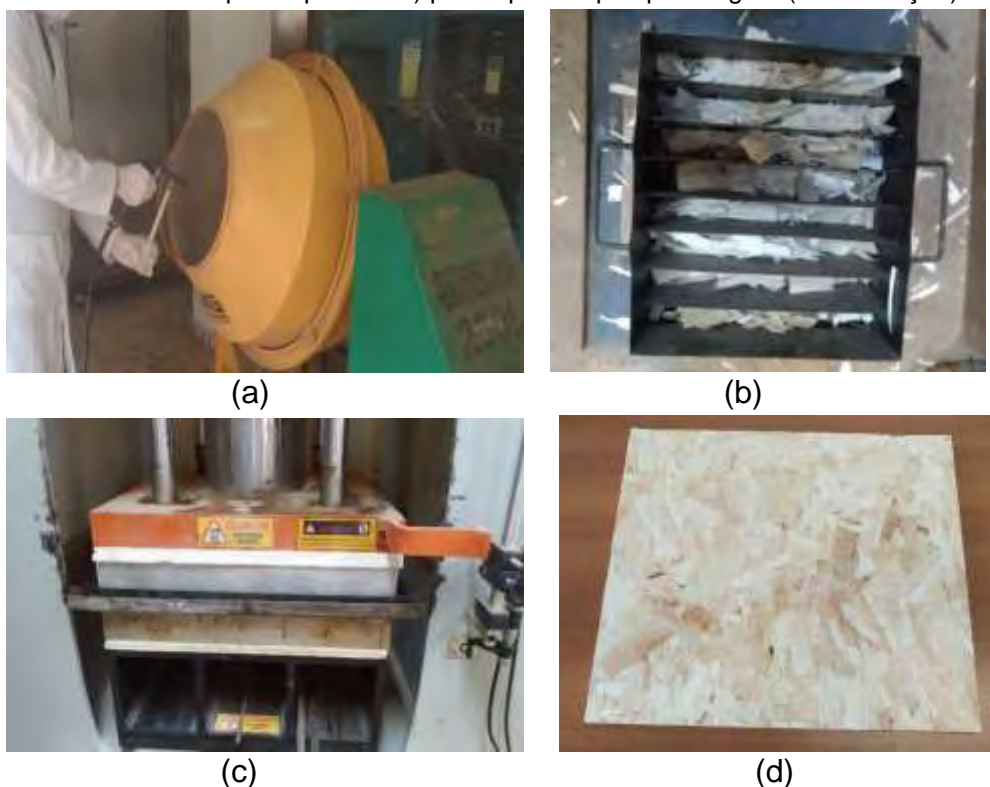
- **Painéis Planos:**

Após a fase de preparo e secagem da matéria-prima, procedeu-se com a conformação e produção dos painéis planos. Primeiramente, foram realizados os cálculos para mensurar a quantidade de matéria-prima e de resina a serem utilizadas considerando painéis de densidade 650 kg/m³, 13% de resina em relação à massa de partículas (madeira), dispostos em um painel com dimensões (400 x 400 x 10 mm).

Com as quantidades de partículas e de resina já calculadas, as mesmas foram pesadas em balança e, por processo de aspersão da resina, foram misturadas com a utilização de equipamento misturador rotativo (Figura 20a). Feito isso, as partículas com resina foram dispostas sobre a placa formadora do painel em três camadas perpendiculares entre si (faces perpendiculares em relação ao miolo), com auxílio de um orientador (Figura 20b), e distribuição em massa (%) na proporção 30:40:30. Em seguida, o colchão de partículas formado foi pré-prensado e inserido em uma prensa termo-hidráulica, com limitadores de metal (10 mm) para limitar a espessura desejada, a uma temperatura de 100°C, durante 10 minutos, pressão média de 3 MPa, para conformação do painel (Figura 20c). As chapas de aço (molde) da prensa termo-hidráulica foram revestidas com papel teflon para evitar a aderência entre as partículas e as chapas utilizadas.

Concluído a prensagem, os painéis OSB foram dispostos à temperatura ambiente por 72 h, período para a cura da resina (Figura 20d).

Figura 20 – Processo de produção dos painéis OSB planos. a) mistura das partículas com a resina por aspersão, b) disposição das camadas do painel antes da prensagem, c) prensagem do painel plano e d) painel plano após prensagem (conformação)



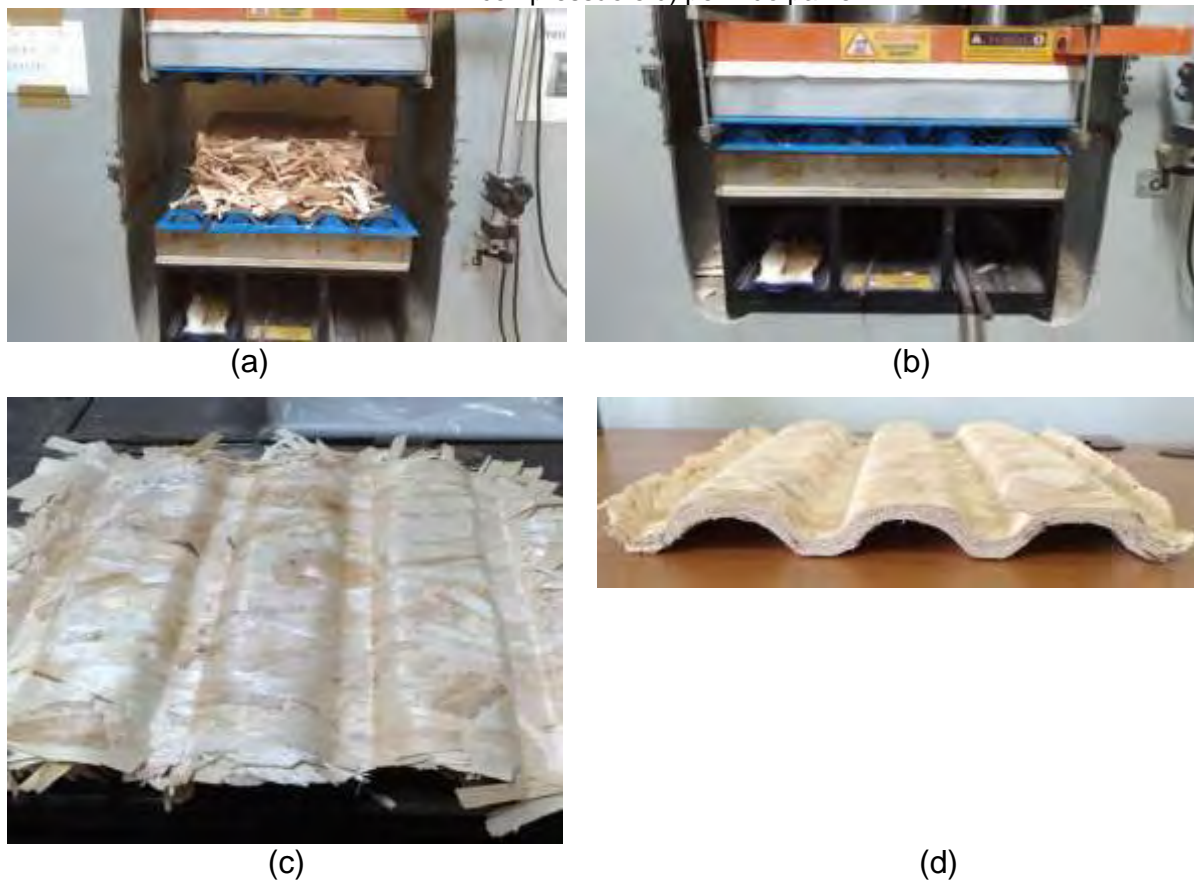
Fonte: Própria autoria.

- **Painéis Ondulados:**

Para a produção dos painéis ondulados que compõe o núcleo dos painéis sanduíche foram realizados os mesmos procedimentos descritos no item anterior no que se refere à conformação dos painéis planos.

Primeiramente foram realizados os cálculos das quantidades de matéria-prima e resina considerando para isso painéis com densidades de 500 e 400 kg/m³, e 13% de resina. Devido à presença de ondulações (alvéolos) em uma das direções do molde, foi considerado para efeito de cálculo um painel retangular com dimensões (480 x 400 x 10 mm). As demais etapas foram feitas de maneira muito semelhante às realizadas para os painéis planos, sendo que para cada densidade (tratamento) foram produzidos dois painéis. A figura 21 mostra o painel ondulado durante o processo de conformação, após a prensagem e o perfil do painel após refilamento.

Figura 21 – Produção do painel ondulado. a) colchão de partículas antes da prensagem, b) conformação (prensagem) do painel OSB ondulado, c) painel conformado após a compressão e d) perfil do painel



Fonte: Própria autoria.

4.2.4.2 COLAGEM DOS PAINÉIS PLANOS JUNTO AO NÚCLEO ONDULADO

A metodologia para a colagem foi adaptada do trabalho realizado por (POZZER et al., 2020). Após a conformação dos painéis e os mesmos serem refilados (apara dos excessos laterais), em serra circular, foi procedido a colagem dos painéis para confecção dos painéis do tipo sanduíche. A colagem das faces planas com o núcleo ondulado foi feita utilizando-se adesivo PU-mamona (resina poliuretana bi componente à base de óleo de mamona), o mesmo utilizado como aglomerante das partículas dos painéis produzidos, na proporção 1:1, numa quantidade de 50g de resina por painel, espalhando-se a cola nas superfícies de contato entre o núcleo e as faces com auxílio de um pincel de pintura 3/4. Posteriormente, foi utilizada uma prensa com ajuste de pressão manual (Figura 22), onde, com o auxílio de um torquímetro, foi aplicado um torque de aproximadamente 28 N.m em cada parafuso, para melhor

adesão entre os painéis. O tempo utilizado para colagem e cura da resina foi de 48 horas.

Figura 22 – Procedimento de colagem das faces planas com o núcleo ondulado com auxílio de prensa manual



Fonte: Própria autoria.

4.2.5 Caracterização térmica, física e mecânica dos painéis planos e sanduíche

As propriedades físicas dos painéis OSB planos foram determinadas seguindo as metodologias e orientações constantes nas normas EN 300:2006 e ABNT NBR 14810-2 (2018) - *Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. Para os painéis sanduíche, foram realizados ensaios de flexão 3 pontos de acordo com as diretrizes das normas ASTM C393:2016 - *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure* e ASTM D3043 (2017) – *Standard Test Method for Structural Panels in Flexure*. Para a caracterização térmica dos painéis planos foram utilizadas as normas ASTM E1530:2011 – *Evaluating the Resistance to Thermal Transition of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique* e NBR 15220-2:2005 – *Desempenho térmico de edificações – Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*.

4.2.5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS PAINÉIS PLANOS (FACES)

- **Densidade Aparente**

Foram realizados ensaios de densidade aparente dos painéis planos seguindo as recomendações do documento normativo EN 323:1993 – *Wood-based panels - determination of density*.

○ **Densidade Aparente das Faces do Painel Sanduíche**

Para a determinação da densidade aparente das faces (chapas planas) foram utilizados 10 corpos-de-prova de dimensões 50 x 50 mm. Foi realizada a pesagem dos mesmos em balança do tipo AY220 e, com um paquímetro, foram aferidas a espessura (medida no ponto de encontro das diagonais do CP) e os lados (dimensões medidas paralelamente às bordas do CP) de cada um dos corpos-de-prova. A densidade foi calculada usando a equação (4.1).

Após pesagem inicial, os corpos-de-prova foram acondicionados em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de (65±5) % de umidade relativa e a uma temperatura de (20±2) °C. Umidade de equilíbrio é quando o resultado de duas operações subsequentes de pesagem do corpo-de-prova, em um intervalo de 24 h, não diferir mais de 0,1 % da massa do corpo-de-prova.

$$\rho = \frac{m}{b1 \times b2 \times t} \quad (4.1)$$

Onde:

ρ = densidade ou massa específica (kg/m³);

m = massa (kg);

t = espessura (m);

$b1, b2$ = dimensões das bordas (m).

• **Absorção de Água 2 e 24 h**

A análise da absorção de água e inchamento dos painéis foi realizada apenas para os painéis das faces, por serem estes mais suscetíveis à ação da umidade do ambiente após aplicação do elemento construtivo (POZZER, 2019). A metodologia utilizada nesta etapa da pesquisa foi baseada nas recomendações da norma NBR 14810-2 (2018) - *Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. Foram retirados 10 corpos-de-prova quadrados com dimensões (50±1) mm de aresta e os mesmos pesados antes e depois da imersão em água (com

pH 7 ± 1 e temperatura de $20\pm 1^\circ\text{C}$). Durante imersão, os corpos-de-prova ficaram cobertos por fio d'água de 25 ± 5 mm por 2 e 24 h.

- **Inchamento em Espessura 2 horas e 24 horas**

Seguindo as mesmas condições de imersão em água descritas anteriormente e de acordo com documento normativo NBR 14810-2 (2018), foram medidas as espessuras dos corpos-de-prova utilizados na etapa anterior de absorção de água com o uso de um paquímetro na interseção das diagonais antes e depois da imersão em água. Os resultados foram comparados com valores máximos recomendados pelo documento EN 300:2006 – Oriented Strand Board (OSB) – *definitions, classification and specification for OSB panels*. As equações (4.2) e (4.3) foram utilizadas para o cálculo da absorção e inchamento em espessura.

$$Am = \frac{m2 - m1}{m1} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

Am = absorção de água 2h e 24h (%)

m1 = massa inicial (g)

m2 = massa após imersão 2h e 24h (g)

$$Gt = \frac{t2 - t1}{t1} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde:

Gt = inchamento em espessura 2h e 24h (%)

t1 = espessura inicial (mm)

t2 = espessura após 2h e 24h (mm)

- **Perfil de Densidade**

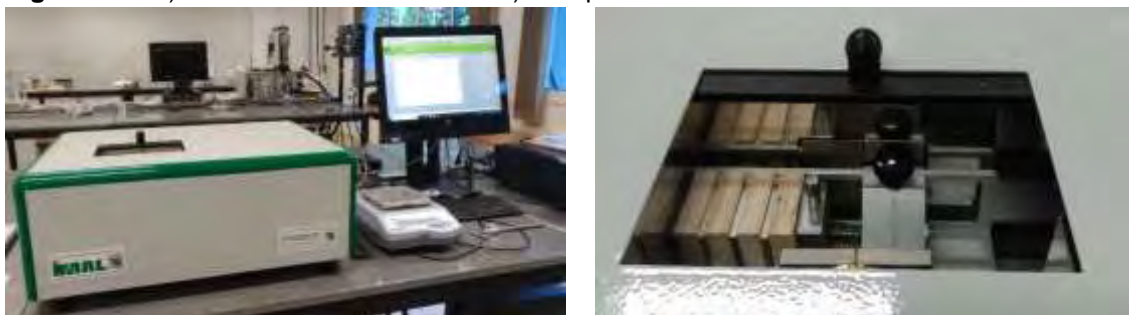
Para este ensaio foi realizado procedimento semelhante ao descrito por Bellini et al. (2009). Foram utilizados quatro corpos-de-prova dos painéis OSB planos produzidos (faces) com dimensões de 10x50x50 mm (espessura, largura e comprimento, respectivamente).

O procedimento de análise do perfil de densidade dos corpos de prova foi realizado utilizando um densitômetro de raio X marca IMAL modelo DPX300-LTE, com

as seguintes características: voltagem de 10-50 kV, corrente 1,5 mA, colimação inicial e final dos feixes de 180 e 90 μm , respectivamente (Figura 23a).

Com a transferência das amostras para o compartimento interno do densitômetro (Figura 23b), iniciou-se o processo de calibração automática do equipamento e a varredura contínua foi realizada ao longo da espessura das amostras. Neste processo, os feixes de raio X são transformados em valores pontuais de massa específica, obtidos a cada 20 μm ao longo da espessura de cada amostra, pelo programa QMS. O perfil de densidade aparente da espessura do painel permite obter os seguintes parâmetros: densidade aparente máxima, mínima, média e nas faces superior e inferior do painel (BELINI et al., 2009).

Figura 23 – a) Densitômetro de Raio X e b) Compartimento interno com as amostras



(a)

(b)

Fonte: Própria autoria.

A obtenção do perfil de densidade dos painéis planos é importante para a avaliação das condições de prensagem dos mesmos bem como para a caracterização de suas propriedades e futuras correlações com resultados a serem obtidos. O perfil de densidade gera informações sobre o comportamento do painel em relação a propriedades como a adesão interna das partículas, resistência ao arrancamento de parafusos e flexão estática (CHAMMA, 2004).

4.2.5.2 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS PAINÉIS PLANOS (FACES)

A análise da condutividade e resistência térmica do painel plano (faces) foi realizada com base nas recomendações da norma ASTM E1530 (2011) – *Evaluating*

the Resistance to Thermal Transition of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique.

Foram extraídos corpos-de-prova circulares de 5 cm de diâmetro dos painéis planos (faces). Para a realização do ensaio utilizou-se o equipamento DTC 300 MODEL 2022. A Figura 24 mostra este equipamento, um exemplo do corpo-de-prova pronto para ser ensaiado (recoberto com pasta térmica nas faces para reduzir a resistência térmica entre a amostra e o equipamento) e o CP sendo ensaiado.

Figura 24 – Ensaio térmico: (a) máquina de ensaio; (b) corpo de prova recoberto com pasta térmica; (c) corpo de prova em ensaio



Fonte: Própria autoria.

A partir do ensaio descrito acima obteve-se os valores de condutividade térmica do painel e, para quantificar a resistência térmica, foram utilizadas as equações (4.4) e (4.5):

$$R_{Térmica} = \frac{T_u - T_m}{Q} - R_{int} \quad (4.4) \quad R_{Térmica} = \frac{e}{\lambda} \quad (4.5)$$

Onde: $R_{Térmica}$ é a resistência térmica da amostra (m^2K/W); T_u é a temperatura da face superior da amostra ($^{\circ}C$); T_m é a temperatura da face inferior da amostra ($^{\circ}C$); Q é o fluxo de calor (W); R_{int} é a resistência total da interface entre a amostra e a superfície das placas (m^2K/W); e é a espessura da amostra (m) e λ é a condutividade térmica (W/mK).

4.2.5.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PAINÉIS SANDUÍCHE COM NÚCLEO ONDULADO

O ensaio de flexão 3 pontos dos painéis OSB sanduíche com núcleo ondulado foi realizado para os dois tratamentos (T1 e T2) de acordo com as diretrizes da norma ASTM C393 (2016) – *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure* e da norma ASTM D3043 (2017) – *Standard Test Method for Structural Panels in Flexure*, utilizando máquina universal EMIC modelo DL 30.000, com uma taxa de deslocamento de 6 mm/min de forma que a ruptura (falha) ocorresse no intervalo de 3 a 6 min. As amostras foram retiradas dos painéis sanduíche produzidos com dimensões de 120 x 370 mm (Largura x Comprimento) em ambas as direções do painel (longitudinal e transversal). As dimensões dos corpos-de-prova, em especial a largura, foram ajustadas de acordo com a geometria do núcleo ondulado do painel de modo que a seção transversal de cada amostra longitudinal englobasse um corte (ondulação) que se repete no sentido do eixo transversal do painel, cobrindo uma célula inteira do núcleo. Foram respeitadas as dimensões máximas para amostras não padronizadas preconizadas pela norma ASTM C 393 (2016).

Este ensaio teve por objetivo avaliar o desempenho dos painéis sanduíche submetidos à flexão, fornecendo subsídios para o cálculo da rigidez à flexão, do momento máximo fletor e identificação do modo de ruptura do material.

Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise inferencial com o intuito de diagnosticar se há a existência de diferença estatística significativa entre os tratamentos estudados. Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado (DIC) e os dados comparados pelo teste de Tukey quando a ANOVA foi significativa, ambos testados com $p < 0,05$, utilizando-se o software Minitab® 19.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PRIMEIRA FASE - CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA Balsa

Este item apresenta os resultados da caracterização química, física e microestrutural (MEV) da Madeira Balsa residual.

5.1.1 Composição química e pH

A tabela 3 apresenta a composição química das partículas de madeira Balsa residual, de madeiras utilizadas pela indústria de processamento de painéis e de resíduos agroindustriais.

Tabela 3 – Composição química das partículas de madeira balsa e resíduos agroindustriais

Resíduos	pH	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Fonte
Madeira Balsa	4,96	70,14	16,13	7,72	Estudo
<i>Pinus</i> spp.	4,48	51,13	15,10	27,29	Fiorelli et al. (2014)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	---	52,00	19,04	28,60	Megaton et al. (2006)
<i>Eucalyptus grandis</i>	---	51,70	20,50	27,80	Megaton et al. (2006)
Fibra de coco	4,39	56,69	16,64	25,11	Fiorelli et al. (2014)
Bagaço de cana	5,11	50,47	30,56	10,74	Fiorelli et al. (2014)
Casca de Amendoim	5,21	44,01	7,70	31,16	Fiorelli et al. (2014)

Fonte: Própria autoria.

As partículas de madeira Balsa apresentaram maior teor de celulose e menor teor de lignina quando comparadas com os resíduos de madeira de *Pinus spp.*, *Eucalyptus* e com os resíduos agroindustriais (tabela 3). A lignina é um composto presente na parede celular das fibras da madeira responsável por conferir rigidez à estrutura do vegetal (ZHANG e HU, 2013), o que proporciona maior resistência à compressão e à dobra. Este polímero amorfo é responsável por manter a união entre as fibras na estrutura da madeira. A espécie *O. pyramidale* apresenta riqueza de parênquima axial e radial, cujas células contêm majoritariamente paredes primárias (BUSS, 2019; PACIULLO, 2002), que tem menos lignina que a parede secundária, o que pode explicar o baixo teor de lignina desta madeira. Segundo Fengel e Wegener (1984) um alto teor de celulose aumenta a resistência da madeira, enquanto que um alto teor de lignina aumenta a sua rigidez, melhorando as propriedades mecânicas dos painéis particulados. A celulose, além de proporcionar resistência, desempenha importante função na adesão das partículas com a resina durante o processo de fabricação dos painéis, melhorando a aglomeração das partículas (BARBIRATO, 2018).

Com relação ao teor de hemicelulose, as partículas de madeira Balsa apresentaram valores inferiores aos aferidos para a madeira e resíduos agroindustriais, com exceção dos resíduos de madeira *Pinus spp* e da casca de amendoim. A hemicelulose, por ser amorfa e possuir configurações irregulares e ramificadas, absorvem água mais facilmente que a celulose (D'ALMEIDA, 1988). Em relação ao pH da amostra de madeira Balsa, este apresentou similaridade com o valor encontrado para madeira *Pinus* utilizada comercialmente. O pH muito ácido inibe as reações químicas do processo de cura da resina, danificando as ligações químicas (IWAKIRI, 2005).

5.1.2 Densidade real e aparente da madeira Balsa

A densidade das partículas da madeira tem importante relação com as propriedades físicas e, conseqüentemente, com as propriedades mecânicas dos painéis produzidos. A tabela 4 apresenta valores médios da densidade real e aparente das partículas de madeira Balsa residual, madeira *Pinus* e de outros resíduos agroindustriais. Observa-se que a densidade aparente da madeira Balsa (200 kg/m^3) é suficiente para classificá-la como madeira de baixa densidade, consideravelmente menor que a da madeira *Pinus sp.* (500 kg/m^3), tendendo a ser mais porosa e absorver mais resina em relação a outras espécies de madeira.

Devido a sua baixa densidade aparente, a madeira Balsa necessita de grandes volumes de material para a produção dos painéis se comparado a outros tipos de madeira utilizadas comercialmente, para uma mesma massa de material. Com relação à densidade real seu valor está próximo dos valores de outros resíduos agroindustriais encontrados na literatura. Este valor se aproxima da densidade da parede celular, que representa a quantidade de material lenhoso, excluindo os espaços vazios (poros) (ROLLO, 2009).

Tabela 4 – Densidade real e aparente das partículas de madeira balsa e de resíduos agroindustriais

Matéria-prima	Densidade Real (kg/m^3)	Densidade Aparente (kg/m^3)	Fonte
Madeira Balsa	1440	200	Estudo
<i>Pinus spp.</i>	1240	500^a	

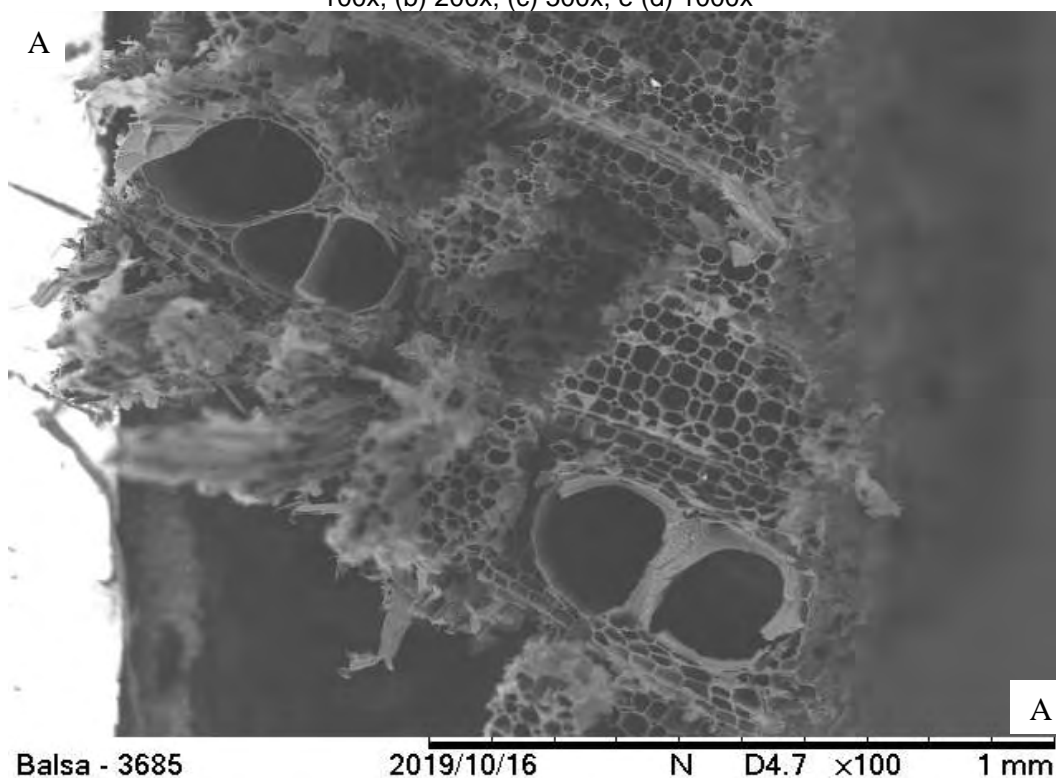
Casca de Amendoim	1370	Fiorelli et al. (2014)
Bagaço de Cana	1400	
Fibra de coco	1290	Curtolo (2013)

Fonte: Própria autoria. ^a Extraído do trabalho de (FERRO, 2018).

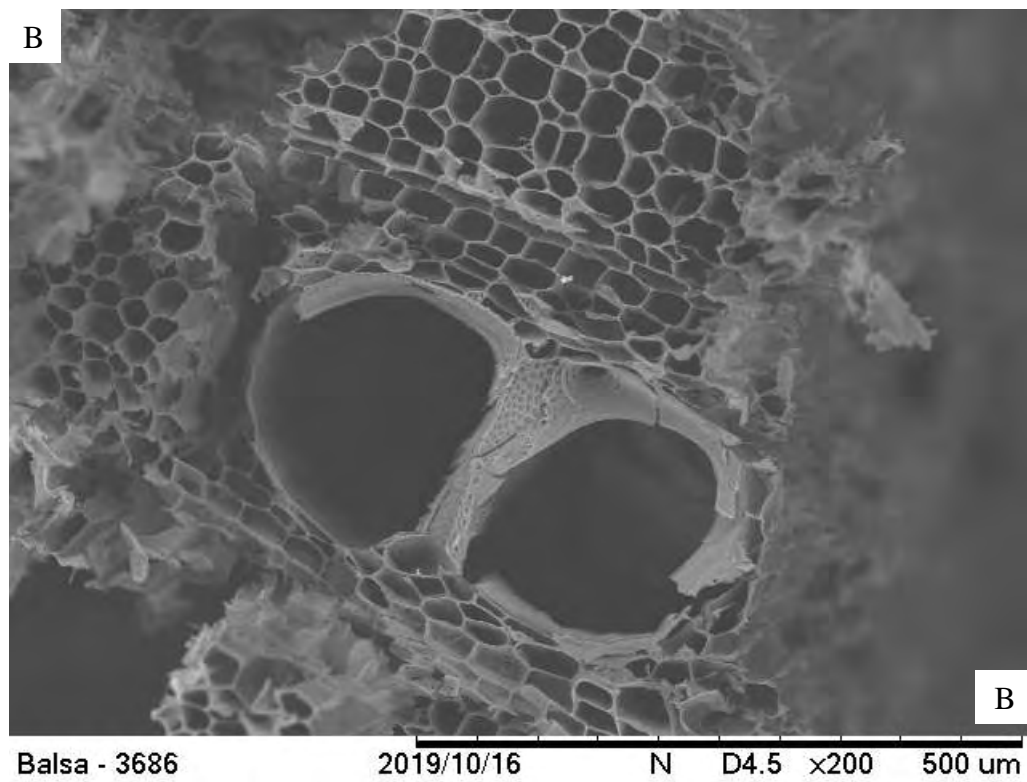
5.1.3 Análise microestrutural

A figura 25 apresenta imagens obtidas por MEV (microscopia eletrônica de varredura) da seção transversal de partículas de madeira Balsa residual com aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x. É possível verificar a estrutura porosa do material, com paredes fibrilares finas e grandes vasos. A grande quantidade de vazios de sua estrutura justifica a baixa densidade da madeira. Segundo Iwakiri (2005) e Finger et al. (2012), as imagens da anatomia da madeira Balsa residual justificam a baixa ancoragem de parafusos e pregos, a alta absorção de água e resina e a fragilidade dessa espécie de madeira.

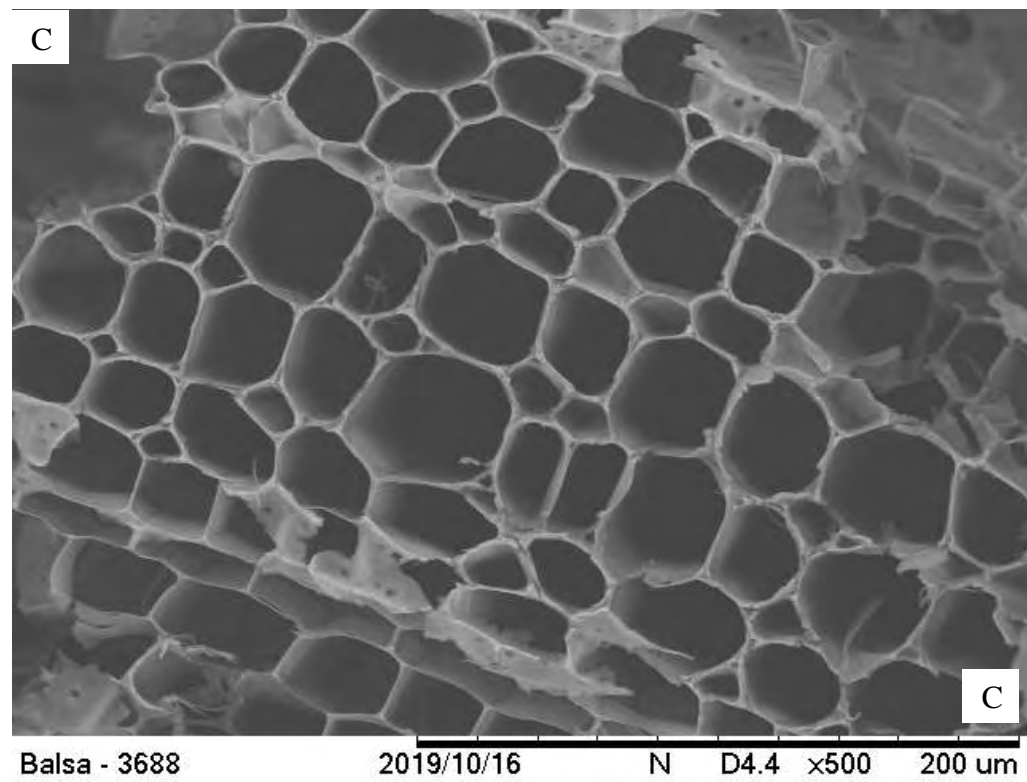
Figura 25 – Corte transversal de partícula de madeira Balsa residual com imagens ampliadas de (a) 100x; (b) 200x; (c) 500x; e (d) 1000x



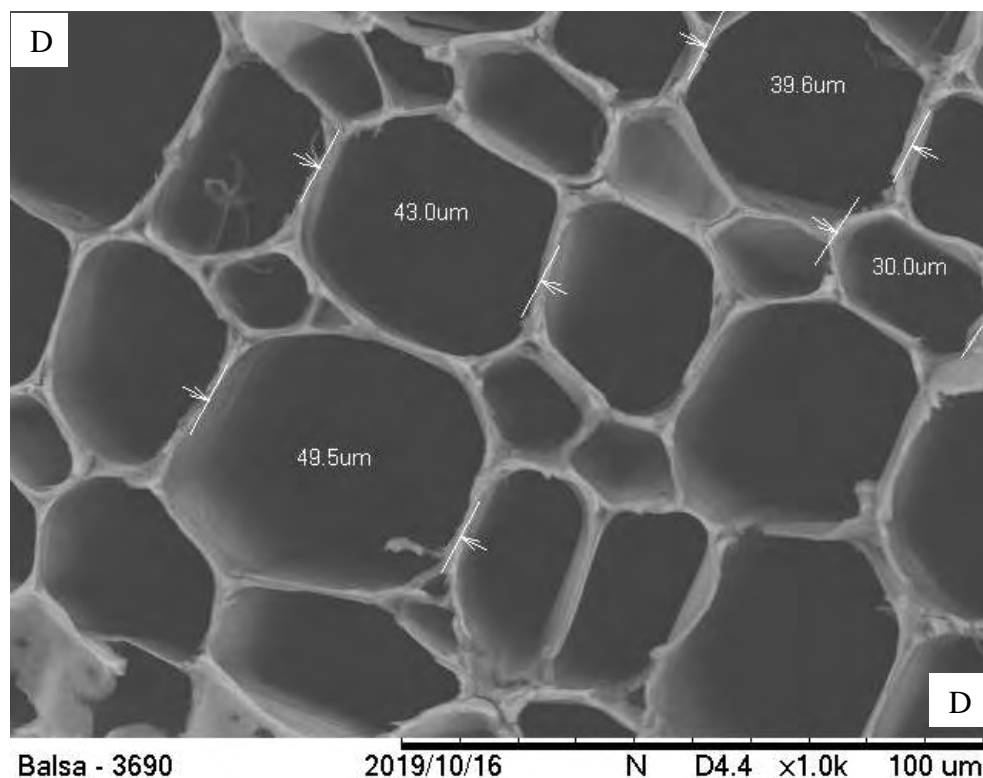
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Própria autoria.

5.1.4 Considerações sobre a primeira fase

A análise química (bromatológica) das partículas de madeira Balsa mostrou um alto teor de celulose e baixo teor de lignina em comparação com outros tipos de madeira e resíduos agroindustriais. O teor de hemicelulose também se mostrou abaixo da maioria dos outros resíduos, porém com valores relativamente próximos (exceção feita ao resíduo de bagaço de cana). O pH apresenta valor próximo ao da madeira *Pinus spp.* e dos resíduos.

A densidade aparente de 200 kg/m^3 é suficiente para classificá-la como madeira de baixa densidade e, em partes, pode ser explicada por sua estrutura interna porosa, fato este evidenciado na análise morfológica via MEV. Sua porosidade e baixa densidade aparente justificam a necessidade de utilização de um maior teor de resina na fabricação dos painéis com este tipo de madeira em relação aos painéis produzidos com matéria-prima mais densa.

5.2 SEGUNDA FASE – CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS OSB PLANOS (FACES) E SANDUÍCHE

Este item apresenta os resultados da caracterização térmica, física e mecânica dos painéis que compõe as faces e do painel sanduíche de faces planas e núcleo corrugado.

5.2.1 Propriedades Físicas (faces)

Os valores médios e respectivos coeficientes de variação das propriedades físicas dos painéis planos (absorção de água - AA, inchamento em espessura - IE e densidade aparente) são apresentados na tabela 5. Os resultados de AA e IE foram comparados com valores máximos indicados pela norma EN 300:2006 – Oriented Strand Board (OSB) – *definitions, classification and specification for OSB panels* e com valores obtidos para painéis semelhantes presentes na literatura.

Tabela 5 – Valores experimentais de propriedades físicas dos painéis planos – faces e presentes na literatura

Painel	AA (%)		IE (%)		Densidade Aparente	Fonte
	2h	24h	2h	24h		
Painel OSB Balsa - Faces	49,74 (25,37)	114,02 (16,50)	11,34 (16,35)	21,12 (24,48)	550,25 (6,70)	Estudo
Painel OSB Balsa (650 kg/m³ - 13% resina PU)				23,26 (28,09)		Lopes Júnior et al. (2020)
Painel OSB Balsa com resina PU-mamona		106² (4,85)		33,57¹ (18,01)		Barbirato et al. (2018 ¹ ,2019 ²)
EN 300:2006 – Painel Tipo 1				25		Norma EN 300:2006

Fonte: Própria autoria.

Os resultados obtidos indicam valores menores de IE após imersão em água por 24 h em relação aos valores obtidos por Lopes Júnior et al. (2020) e Barbirato et al. (2018). Lopes Júnior et al. (2020) utilizou painéis OSB planos com o mesmo tipo de matéria-prima, mesmo teor de resina e densidade 650 kg/m³, obtendo valores de IE = 23,26%. Com relação ao valor máximo permitido pela norma (25%), o painel

apresenta características que permite classificá-lo como painel do tipo 1, para uso em móveis ou ambientes interiores secos. Os valores de AA são similares aos apresentados por Barbirato et al. (2019) que avaliaram painéis OSB de madeira Balsa de 650 kg/m³ e teor de resina 15%.

O painel OSB de madeira Balsa residual apresentou tendência a absorver mais água quando comparado com estudos de painéis de partículas de outros resíduos agroflorestais (FIORELLI et al. (2019); NAKANISHI et al. (2018); VARANDA et al. (2018)), tendência que pode ser justificada pela porosidade da madeira Balsa e também, pela baixa densidade, que exige maior volume de matéria prima para a conformação dos painéis.

Com relação à densidade aparente obteve-se um valor médio de 550 kg/m³, apresentando um desvio da ordem de 100 kg/m³ em relação ao valor esperado (densidade-alvo) de 650 kg/m³. Barbirato (2018) apresentou valores de densidade média para painéis OSB de madeira Balsa com desvios em relação à densidade-alvo próximos ao obtido no presente estudo. A justificativa para o valor de densidade abaixo do esperado pode ser a carga de pressão utilizada, da ordem de 3 MPa, menor que a carga utilizada em outros trabalhos com materiais semelhantes (BARBIRATO et al. 2018, 2019; LOPES JÚNIOR et al., 2020) e a liberação de tensões no momento da descompressão do painel após a prensagem. A espessura obtida para os painéis variou no intervalo entre 13 e 15 mm (espessura nominal esperada – 10 mm), conduzindo a valores de densidade aparente mais baixos do que o esperado.

5.2.1.1 PERFIL DE DENSIDADE

Para os 4 corpos-de-prova retirados das faces dos painéis sanduíche são mostrados na tabela 6 os valores médios dos seguintes parâmetros: densidade média, densidade a 2 mm da face da esquerda, densidade a 2 mm da face da direita e densidade no centro dos CP (painel). A figura 26 ilustra os perfis para cada um dos CP ensaiados bem como o valor médio.

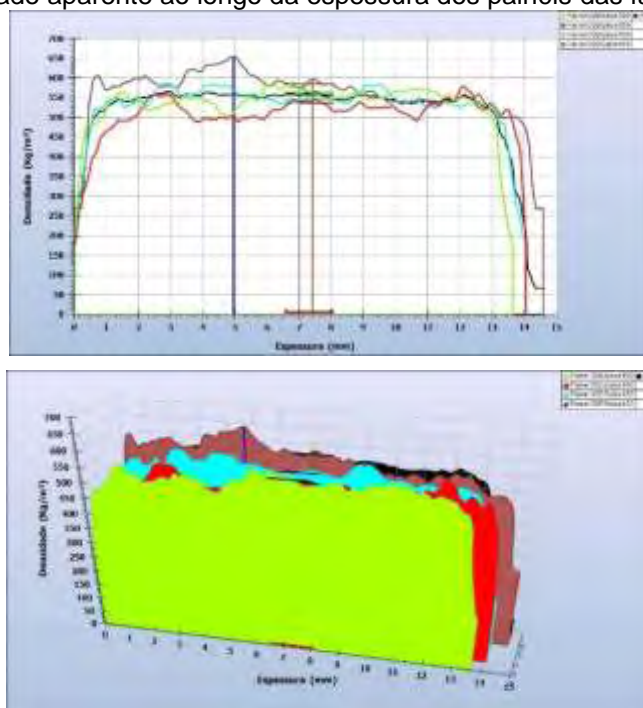
Tabela 6 – Valores médios para densidade (massa específica) das camadas externas, central e média do painel das faces

DENSIDADE (kg/m ³)	MÉDIAS (kg/m ³)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
Densidade Média	530,1	3,95

Densidade a 2mm (Esq.)	555,1	3,82
Densidade a 2 mm (Dir.)	551,7	6,51
Densidade Central	560,4	4,06

Fonte: Própria autoria.

Figura 26 – Perfis de densidade aparente ao longo da espessura dos painéis das faces (2D e 3D)



Fonte: Própria autoria.

A tabela 6 mostra uma variação pequena nos valores de densidade aparente no interior do painel (máximas à esquerda e à direita, média e no centro), variando de 530,1 a 560,4 kg/m³, o que é um indício de uma compactação uniforme.

Na figura 26 pode-se notar essa tendência pelo perfil de densidade sem a presença de picos mais acentuados de densidade. Segundo Belini et al. (2009) este tipo de perfil é característico de painéis MDF com baixas pressões durante a prensagem e/ou baixa umidade do colchão de fibras.

O painel apresentou valores relativamente altos de densidade aparente na região central, o que pode estar relacionado com um melhor desempenho em propriedades como a resistência à tração perpendicular e arrancamento de parafuso topo (BELINI et al., 2009).

5.2.2 Propriedades Térmicas (faces)

A propriedade térmica avaliada para os painéis OSB planos aglomerados com resina PU-mamona que compõe as faces do painel sanduíche foi a condutividade térmica (CT).

O valor médio da condutividade térmica e os valores indicativos da norma NBR 15220-2:2005 - *Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*, para painéis aglomerado de partículas de madeira, são mostrados na tabela 7.

Tabela 7 – Valor médio de condutividade térmica obtido para o painel das faces e valores indicados pela norma NBR 15220-2:2005

Painel		CT (W/mK) (COV)	Fonte
Painel OSB Balsa – Faces		0,146 (0,79)	Estudo
Aglomerado de Partículas de Madeira (NBR 15220:2005)	550 – 650 kg/m ³	0,140	NBR 15220:2005
	650 – 750 kg/m ³	0,170	

Fonte: Própria autoria.

A condutividade térmica dos painéis estudados atendeu à recomendação da NBR 15220-2:2005, que estabelece uma condutividade térmica entre 0,14-0,17 W/mK para painéis aglomerados de partículas de madeira de média densidade, indicando que o material em estudo apresenta potencial para aplicações como isolante térmico. Essa propriedade de resistência ao fluxo de calor tem relação com a quantidade de espaços vazios (porosidade) que existe no interior do material.

O ar presente nos vazios apresenta baixíssima condutividade térmica, reduzindo a taxa de transferência de calor no interior do painel, que por sua vez absorve e espalha a radiação (AL-HOMOUD, 2005). Para Wang (1988) materiais que apresentam condutividade térmica menor que $0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ são considerados como isolantes térmicos.

5.2.3 Propriedades Mecânicas (painel sanduíche)

Os resultados referentes às propriedades mecânicas dos painéis sanduíche com núcleo ondulado, obtidos por meio do ensaio de flexão 3 pontos - EI (rigidez à flexão) e F_bS (momento máximo) - são apresentados nas tabelas 8 e 9. Estes resultados foram comparados com valores obtidos em outros trabalhos presentes na literatura e também avaliados com base no documento normativo PS-2-10 (APA – The Engineered Wood Association) que especifica classes de uso para painéis OSB com vistas à sua aplicação na construção civil.

Tabela 8 - Valores experimentais médios de EI e F_bS e apresentados na literatura.

Tipo de Painel		Bending Stiffness- EI (N.mm ² /mm) x 10 ⁶		Maximum Moment- F _b S (N.mm/mm)		Fonte
		Long.	Transv.	Long.	Transv.	
Painel OSB Sanduíche Ondulado	T1-400	5,28 ^a (22,4)	3,96 ^a (14,1)	2430 ^a (14,4)	1140 ^a (19,7)	Estudo
	T2-500	6,48 ^a (20,6)	6,44 ^b (13,2)	3065 ^a (11,3)	2138 ^b (17,2)	
Painel Trapezoidal de Bagaço de cana de açúcar		2.1 (27.5)	0.73 (10.5)	1199 (29.9)	819 (19)	Pozzer et al. (2020)
Molded Core Panel (MCP)		19.1 (5.0)	12.1 (7.5)	3950 (12.3)	3353 (14.6)	Way et al. (2016)

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes em uma mesma coluna diferem significativamente a 5% pelo teste de Tukey.

O tratamento T2 apresentou valores médios de EI e F_bS superiores aos obtidos para o tratamento T1. Porém, a análise estatística indicou diferença significativa ($p < 0,05$) para (EI) e (F_bS) apenas na direção transversal dos painéis, que corresponde ao sentido das ondulações do núcleo. Uma possível explicação para isso pode ser a própria estrutura e geometria do molde do núcleo, que propiciaram uma melhor conformação para os corpos-de-prova no sentido transversal, evidenciando a diferença entre os tratamentos.

Pozzer et al. (2020) avaliaram painéis sanduíche com núcleo trapezoidal constituído de partículas de bagaço de cana-de-açúcar aglomeradas com resina

poliuretana bi componente à base de óleo de mamona (PU-mamona). Foram produzidos painéis com dois tratamentos diferentes e os melhores resultados para as propriedades de rigidez à flexão e momento máximo longitudinal e transversal estão apresentados na tabela 8. Os painéis de madeira Balsa residual (T1 e T2) apresentaram propriedades superiores aos obtidos pelos autores.

Os painéis produzidos e avaliados por Way et al. (2016) apresentaram desempenho mecânico à flexão superior. Foram produzidos de painéis sanduíche de núcleo corrugado OSB com 90% de madeira-aspen (*Populus sp.*) e 10% de madeira de lei mista. Os painéis foram produzidos com um teor de resina fenol formaldeído (PF) de 4% em relação ao peso, uma densidade média de núcleo de 640 kg/m³ e uma densidade de face média de 630 kg/m³. Os autores obtiveram os valores de EI 19,1 x 10⁶ N-mm²/mm e 12,1 x 10⁶ N-mm²/mm nos sentidos longitudinal e transversal de direção das partículas e F_bS de 3950 N-mm/mm e 3353 N-mm/mm para os sentidos longitudinal e transversal de direção das partículas.

A tabela 9 apresenta os valores médios da rigidez à flexão (EI) e do momento máximo na flexão do presente estudo e os valores indicativos do documento PS-2-10 da APA (The Engineered Wood Association, 2011), que estabelece requisitos mínimos para aplicação de painéis OSB como elementos construtivos.

Tabela 9 – EI e F_bS experimentais e estabelecido pelo PS-2-10 (2011)

Use	Class*	EI		F _b S	
		(N-mm ² /mm)		(N-mm/mm)	
		Long.	Trans.	Long.	Trans.
Sealing	Roof -32/subfloor-16	0.5x10 ⁶	0.3x10 ⁶	460	190
	Roof -40/subfloor-20	1.2x10 ⁶	0.4x10 ⁶	810	360
	Roof -32/subfloor-16	1.8x10 ⁶	0.7x10 ⁶	920	510
Structural	½	0.5x10 ⁶	0.3x10 ⁶	460	330
	19/32 & 5/8	1.2x10 ⁶	0.5x10 ⁶	810	500
	23/32 & ¾	1.8x10 ⁶	0.7x10 ⁶	920	650
Flooring	Single Floor – 24	1.6x10 ⁶	0.5x10 ⁶	910	320
	Single Floor – 32	4.2x10 ⁶	1.3x10 ⁶	1570	600
	Single Floor – 48	8.6x10 ⁶	2.1x10 ⁶	2080	820
	T1 – 400	5,28x10⁶	3,96x 10⁶	2430	1140

T2 – 500	6,48x10⁶	6,44x10⁶	3065	2138
-----------------	----------------------------	----------------------------	-------------	-------------

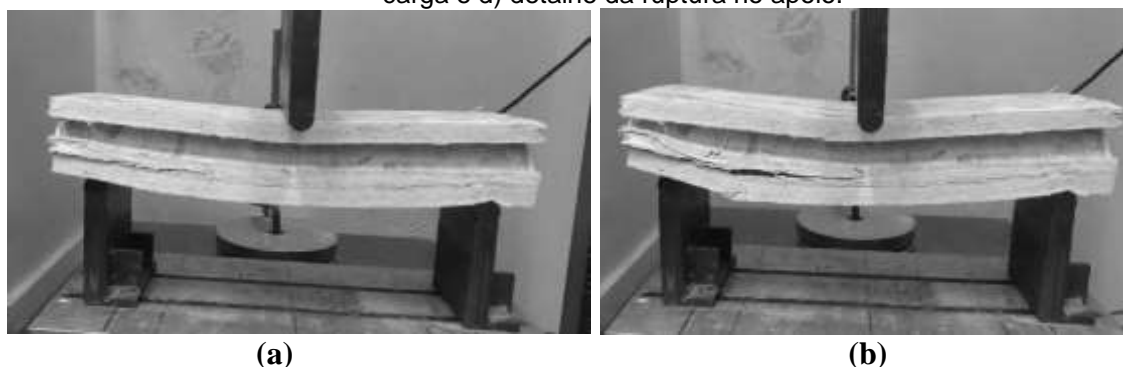
Fonte: Própria autoria. *Os números e frações apresentados na coluna Classe referem-se ao vão máximo que o painel suporta ou à espessura do painel, no caso dos estruturais.

T1 e T2 apresentaram valores que permitem classificá-los como painéis passíveis de serem utilizados como elementos para vedação, estruturais e para piso com vão máximo de até 32 polegadas (81,28 cm). Os resultados acima expostos servem de base para a escolha do tratamento T1-400 como o mais eficiente uma vez que utiliza em sua constituição uma menor quantidade de matéria-prima.

5.2.3.1 ANÁLISE DO MODO DE FALHA (RUPTURA) DOS CORPOS-DE-PROVA

Para os corpos de prova longitudinais houve uma tendência de falha inicialmente na linha de cola entre o núcleo e a face inferior da amostra, conduzindo posteriormente a uma ruptura total por cisalhamento do núcleo (Figuras 27a e 27b). Este fenômeno está de acordo com o preconizado pela norma ASTM C393 (2016), que estabelece o cisalhamento do núcleo ou da ligação núcleo-face como os únicos modos de falha aceitáveis para este teste. Os corpos de prova transversais apresentaram tipos de ruptura mais localizados na região próxima dos apoios e no ponto de aplicação da carga. Este fato pode ser explicado devido a configuração da amostra que, em relação às amostras longitudinais, apresentam linhas de cola mais distribuídas e em direção ortogonal à ação do momento fletor (Figura 27c e 27d). Todos os tratamentos estudados apresentaram comportamentos quanto à ruptura semelhantes.

Figura 27 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de flexão. a) início de ruptura por cisalhamento na linha de cola (amostra longitudinal), b) cisalhamento da interface núcleo-face inferior e início de ruptura do núcleo, c) amostra transversal com ruptura no apoio e no ponto de aplicação da carga e d) detalhe da ruptura no apoio.





Fonte: Própria autoria.

5.2.4 Considerações sobre a segunda fase

O painel que constitui as faces dos painéis sanduíche apresentou propriedades físicas (absorção de água e inchamento em espessura) próximas aos resultados obtidos para painéis do mesmo tipo presentes na literatura e que satisfaz as exigências da norma EN 300:2006; o painel OSB apresentou tendência a absorver mais água em comparação com painéis de partículas de outros resíduos agroindustriais.

A carga de prensagem média de 3,0 MPa utilizada se mostrou insuficiente para a conformação dos painéis planos e manutenção da espessura desejada (10 mm); no entanto, o perfil de densidade mostra uma tendência de uniformidade nos valores de densidade ao longo da espessura.

O valor de condutividade térmica do material está dentro das condições exigidas pela norma NBR 15220-2:2005.

Todos os tratamentos avaliados para os painéis sanduíche (T1 e T2) apresentaram resultados para propriedades mecânicas que permitem classificá-los como painéis para uso estrutural, inclusive como piso.

6 CONCLUSÕES

O resíduo de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) apresentou características químicas, físicas e microestrutural que o colocam como um material potencial para ser utilizado na produção de painéis OSB planos e sanduíche.

Os painéis das faces (planos) apresentaram propriedades físicas (absorção de água e inchamento em espessura) próximas aos resultados obtidos para painéis

do mesmo tipo presentes na literatura e que satisfaz as exigências da norma EN 300:2006, permitindo classificá-los como painéis OSB tipo 1.

A condutividade térmica dos painéis planos está dentro das condições exigidas pela norma NBR 15220-2:2005 e o material é isolante.

Os painéis OSB sanduíche com núcleo de geometria ondulada e faces planas de partículas de madeira Balsa residual aglomeradas com resina PU-mamona atenderam os requisitos da norma PS-2-10 e podem ser utilizados na construção civil.

Os painéis T1 e T2 apresentaram resultados para propriedades mecânicas (rigidez à flexão e momento máximo na flexão) que permitem classificá-los como painéis para uso estrutural e como piso.

O painel com faces planas de densidade (550 kg/m^3) e núcleo de baixa densidade (400 kg/m^3) - T1, é indicado como o mais eficiente por apresentar propriedades mecânicas que atendem às recomendações normativas, com menor consumo de matéria-prima e menor densidade.

7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

A madeira Balsa residual apresentou potencial para produção de painéis OSB sanduíche de núcleo ondulado. No entanto, existe a necessidade de realizar estudos adicionais no que tange à caracterização e aplicação desses painéis em escala real.

Ensaio mecânicos complementares podem ser realizados, tais como: ensaio de compressão plana; arrancamento e rolamento de parafuso; conexão lateral; cisalhamento no plano; cisalhamento em paredes de pequena escala e ensaios de corpo duro e corpo mole.

A aplicação dos painéis em sistemas construtivos de vedação executados em escala real é uma área a ser investigada.

REFERÊNCIAS

AL-HOMOUD, M. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulations materials. **Building and Environment**, Kidlington, v.40, p.353-366, 2005.

ALLEN, H. G. **Analysis and design of structural sandwich panels**. Oxford: Pergamon Press, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2018) **ASTM D 7249**. Standard Test Method for Facing Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure. West Conshohocken, PA, 2018.

_____. (2016) **ASTM C 393**: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. West Conshohocken, PA, 2016.

_____. (2020) **ASTM D7250**: Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

_____. (2011) **ASTM E 1530**: Evaluating the Resistance to Thermal Transition of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. West Conshohocken, PA, 2011.

APA - The Engineered Wood Association. **Panel Design Specifications**. Tacoma, WA, USA, 2012.

APA - The Engineered Wood Association. **PS 2-10 Performance Standard for Wood-Based Structural-Use Panels**. Tacoma, WA, USA, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

_____. (1997) **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.

BALSABAUM. Imagem de uma tora de madeira balsa sendo carregada por um homem. 2014. **Disponível em:** <<https://www.balsabaum.com/sortiment/>>. **Acesso em:** 21 ago. 2019.

BARBIRATO, G. H. A. **Forro OSB de madeira Balsa residual aplicado em protótipo de aviário**. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

BARBIRATO, G. H. A. et al. OSB Panels with Balsa Wood Waste and Castor Oil Polyurethane Resin. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-9, 2018.

BELINI, U. L.; FILHO, T.; CHAGAS, M. P. Densitometria de raios X aplicada na avaliação tecnológica de painéis MDF de eucalipto X ray densitometry applied to technological evaluation of MDF panels of eucalyptus. **Scientia Forestalis**, v. 37, p. 343–350, 2009.

BELINI, U. L. et al. Painel multicamada com reforço de partículas de bambu. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 421-427, 2014.

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.; GIBSON, L. J. Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. **Mechanics of Materials**, v. 84, 2015.

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

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.

BRITO, F. M. S. **Produção e avaliação da qualidade de painéis aglomerados constituídos por partículas de bagaço de cana-de-açúcar e bambu**. 2017. 216 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

BUSS, R. **CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE *Ochroma pyramidale* (CAV. EX LAM.) URBAN (pau-de-balsa) E PRODUÇÃO DE PAINÉIS PARTICULADOS DE BAIXA DENSIDADE**. 2019. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

CALLISTER JR., W. D. **MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: An Introduction**. 7th ed. Nova York, EUA: John Wiley and Sons, 2006.

CANGEMI, J. M. **Biodegradação de Poliuretano Derivado do Óleo de Mamona**. 2006. 163 p. Tese (Doutorado em Ciências - Química Analítica) - Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2006.

CARLSSON, L. A.; KARDOMATEAS, G. A. **Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites**. New York: Springer, 2011.

CHAMMA, P. V. C. **Produção de painéis a partir de resíduos sólidos para uso como elemento arquitetônico**. 2004. 138 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2004.

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

COPROMAB-MT. **Pau-de-balsa: aptidões e desafios.** EMBRAPA-MT. 2012.

CORTEZ-BARBOSA, J. et al. Bamboo particulate waste - production of high performance structural panels. In: LAHR, F. A. R.; SAVASTANO JÚNIOR. H.; FIORELLI, J. **Non-conventional building materials based on agro-industrial wastes.** Bauru, SP: Tiliform, 2015. 328 p.

CRUZ, F. Q. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíche híbridos para a reabilitação de pisos de edifícios.** 2017. 244p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Braga/Guimarães, Portugal, 2017.

CURTOLO, D. D. **Estudo da viabilidade de produção de painéis de partículas homogêneas de maravalha de *Pinus spp* e fibra da casca de coco verde.** 2013. 68 f. Monografia (Engenharia de Biosistemas) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.

DA SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais.** 2003. 157 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

D'ALMEIDA, M. L. O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: D'ALMEIDA, M. L. O. et al. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica.** 2. ed. São Paulo: SENAI/IPT, 1988. v. 1, cap. 3, p. 45-106.

DENES, L.; LANG, E. M.; MCNEEL, J. F. Development of veneer-based corrugated composites, Part 1: manufacture and basic material properties. **Bioresources**, North Carolina State, USA, v. 12, ed. 2, p. 774-784, 2017.

DENES, L. et al. Development of veneer-based corrugated composites, Part 2: evaluation of structural joints and applications. **Bioresources**, North Carolina State, USA, v. 12, ed. 2, p. 3478-3489, 2017.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana a 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, 151 p. 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **European Standard - EN 300:** oriented strand boards (OSB): definitions, classification and specifications. Bruxelas, 2006.

_____. **EN 317:** Particleboards and fibreboards: determination of swelling in thickness after immersion in water. Bruxelas, 1993.

_____. **EN 319:** Particleboards and fibreboards: determination of tensile strength

perpendicular to the plane of the board. Bruxelas, 1993.

_____. **EN 323**: Wood-based: determination of density. Bruxelas, 1993.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultra structure - reactions**. Berlin: [s.n.].

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

FERRO, F. S. et al. Effect of alternative wood species and first thinning wood on oriented strand board performance. **Advances in Materials Sciences and Engineering**, v. 2018, p. 1-7, 2018.

FINGER, Z.; LOGSDON, N. B.; ROCHA, K. J. Descrição dendrológica e caracterização física da madeira de Pau-de-balsa, *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam) Urb. **Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira**. Anais, Vitória, UFES, 2012.

FIORELLI, J. et al. Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers. **Cellulose**, 2014.

HELLMEISTER, V. **Painel OSB de resíduo de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*)**. 2018. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

HILLIG, E. **Qualidade de chapas aglomeradas estruturais, fabricada com madeira de Pinus, Eucalipto e Acácia negra, puras ou misturadas, coladas com tanino-formaldeído**. 2000. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

HILLIG, E.; HASELIEN, C. R.; SANTINI, E. J. Propriedades mecânicas de chapas aglomeradas estruturais fabricadas com madeira de Pinus, Eucalipto e Acácia negra. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 59-65, 2002.

HILLIG, E.; SCHNEIDER, V. E.; PAVONI, E. T. Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção. **Produção**, v. 19, n. 2, p. 292-303, 2009.

HUA, L. et al. Research on OSB panels from waste poplar veneer. In: PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE ON ENGINEERED WOOD PRODUCTS BASED ON POPLAR/WILLOW WOOD, 2008, Nanjing, China. **Proceedings...**2008, Nanjing, China, p. 182-193.

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 de 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 strand board (OSB) as referred structural panel. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON SOLID WOOD PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGY, 1998, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: SIF, 1998. p. 169-172.

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

KELLY, M. W. **A critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards**. Madison, U.S.: Department of Agriculture, 1977. (General Technical Report, FPL-10).

KERMANI, A. Performance of structural insulated panels. **Structures & Buildings**, Edinburgh, UK, p. 13-19, 2006.

KHODER, M. I. et al. Indoor and outdoor formaldehyde concentrations in homes in residential areas in Greater Cairo. **J.E.M.**, Cairo, Egito, v. 2, p. 123-126, 2000.

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

LOPES JÚNIOR, W. E. **Estudo da durabilidade de painéis OSB de madeira balsa residual com revestimento química e natural**. 2020. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2020.

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

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.

MENDES, L. M. ***Pinus ssp.* na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 2001. 103 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MENDES, L. M. et al. *Pinus ssp.* na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 135-145, dez. 2002.

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

NAKANISHI, E. Y. **Estudo de biofilmes funcionais como revestimento em painéis multicamada para uso em instalação agroindustrial**. 2018. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

MIDGLEY, S.; BLYTH, M.; HOWCROFT, N.; MIDGLEY, D.; AND BROWN, A. Balsa: biology, production and economics in Papua New Guinea. **ACIAR Technical Reports No. 73**. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra, 98 pp. 2010.

NALLAGULA, S. Behavior and Flexure Analysis of Balsa Wood Core Sandwich Composites : Experimental , Analytical and Finite Element Approaches. 2006.

NUNES, P. C. C. **Teoria do arco de alvenaria: uma perspectiva histórica**. 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, ENC/FT/UnB, 2009.

OH, Y. et al. Evaluation of phenol-formaldehyde OSB resins modified with lignin residues from acid-hydrolyzed waste newsprint. **Forest Products Journal**, Madison, v. 44, ed. 2, p. 25-29, fev. 1994.

OLIVEIRA, C. Mercado e potencial de biomassa para energia. **Revista da Madeira**. Ed. 133, dez. 2012. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1631&subject=Biomassa&title=Mercado%20e%20potencial%20de%20biomassa%20para%20energia. Acesso em: 25 de junho de 2020.

PACIULLO, D. S. C. Características anatômicas relacionadas ao valor nutritivo de gramíneas forrageiras. **Ciência Rural**, v. 32, n. 2, abr. 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000200029>

PLURAL. **Resina Poliuretana LECOPOL F0911 - Boletim Técnico**. Plural Indústria e Comércio de Produtos Químicos. São Carlos-SP. 2015.

POZZER, T. F.; FIORELLI, J. **Painel Sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de cana-de-açúcar**. Cáceres: Anais do REHABEND Congress, 2018.

POZZER, T. F. **Painel sanduíche com núcleo corrugado de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina PU-mamona**. 2019. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2019.

POZZER, T. et al. Trapezoidal core sandwich panel produced with sugarcane bagasse. **Construction and Building Materials**, 264, p.1-6, 2020.

RODRIGUES, R. **Análise econômica da utilização de resíduos agroindustriais em painéis de partículas: produção à base de bagaço de cana-de-açúcar.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2018.

ROLLO, L. C. P. **Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira.** 2009. 48 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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.

SÁLES, J. J. de; MUNAIAR NETO, J.; MALITE, M.; DIAS, A. A.; GONÇALVES, R. M. **Sistemas estruturais: teoria e exemplos.** São Carlos: SET/EESC/USP, 2005. 266 p.

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

SANTIN, J. C. **Avaliação silvicultural de pau-de-balsa.** 2018, 68 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Sinop, 2018.

SANTOS, M. C. S. **Estabilidade e fenômenos de localização em elementos de painel sanduíche.** 1994, 151 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 1994.

SEDER-MT. **Diretrizes técnicas para o cultivo de pau-de-balsa no estado de Mato Grosso.** Secretaria de Estado de Desenvolvimento Rural do Estado de Mato Grosso. Cuiabá, Mato Grosso, 2011.

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

SURDI, P. G. **Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir da madeira de um híbrido de Pinus elliottii var. elliottii x Pinus carebaea var. hondurensis.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.

SURDI, P. G. **Aproveitamento de resíduos do processamento mecânico de madeiras amazônicas para a produção de painéis aglomerados de alta densificação.** 2015. 200 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

TEODORO, A. S. **Utilização de adesivos à base de taninos na produção de painéis de madeira aglomerada e OSB.** 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.

TITA, V. **Projeto e Fabricação de Estruturas em Material Compósito Polimérico**. Notas de aula. Universidade de São Paulo, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2007. 68 p.

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

VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant**. New York: Cornell University Press, 1994.

VASCONCELOS, F. R. S.; SILVA JÚNIOR, F. G.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Aproveitamento de subproduto da laminação de eucalipto (rolo-resto) para a produção de celulose kraft. In: VIII CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 2003, São Paulo. **Anais...**São Paulo, Brasil, 2003.

VILA ZEGARRA, B. E. **Caracterização da estrutura anatômica e da densidade do lenho de Pinus taeda e efeito nas propriedades tecnológicas dos painéis OSB**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

VIRTUHAB. Virtuhab, 2017. Disponível em: <<http://virtuhab.wixsite.com/virtuhab/osb>>. Acesso em: 18 set. 2019.

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

VOTH, C. R. **Lightweight sandwich panels using small-diameter timber wood-strands and recycled newsprint cores**. 2009. 102 p. Dissertation (M.S.) - Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, 2009.

WANG, S. H. **Construction materials science**. Beijing: China Construction Industry Publisher, 1988.

WAY, D. **Proof of concept for a three-dimensional molded core wood-strand sandwich panel**. p. 123, 2015.

WAY, D. et al. Evaluation of a Wood-Strand Molded Core Sandwich Panel. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 9, p. 04016074, 2016.

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.

WHITE, N. et al. WOOD-STRAND SANDWICH PANELS FOR PANELIZED CONSTRUCTION. p. 2–4, 2015.

ZHANG, LI; HU, YINGCHENG. Novel lignocellulosic hybrid particleboard composites made from rice straws and coir fibers. **Materials and Design**, v. 55, p. 19-26, 2013.

ZENKERT, D. **An introduction to sandwich structures**. Student edition: Emas Publishing, London. 2005.