

**Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB
Departamento de Engenharia de Produção – DEP**

JOÃO VICTOR BERTOLINO PIZZA

**GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO
(EPS) PÓS-CONSUMO PARA OBTENÇÃO DE ECOPAINÉIS**

Bauru - SP
2024

**Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB
Departamento de Engenharia de Produção – DEP**

JOÃO VICTOR BERTOLINO PIZZA

**GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO
(EPS) PÓS-CONSUMO PARA OBTENÇÃO DE ECOPAINÉIS**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB – Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus Bauru.

Área de concentração: Gestão de Sistemas Produtivos
Linha de Pesquisa: Sustentabilidade e Sistemas Produtivos.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Marília da Silva Bertolini
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza

Bauru– SP
2024

Pizza, João Victor Bertolino.

Gerenciamento de resíduos de poliestireno expandido (eps) pós-consumo para obtenção de ecopainéis/ João Victor Bertolino Pizza. - Bauru, 2024
99 f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientadora: Marília da Silva Bertolini
Coorientador: Ricardo Gabbay de Souza

1. Painéis de partículas de madeira. 2. Poliestireno expandido. 3. Resíduo pós-consumo. 4. Propriedades térmicas. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JOÃO VICTOR BERTOLINO PIZZA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 07 dias do mês de fevereiro do ano de 2024, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JOÃO VICTOR BERTOLINO PIZZA, intitulada **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) PÓS-CONSUMO PARA OBTENÇÃO DE ECOPAINÉIS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. MARILIA DA SILVA BERTOLINI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Instituto de Ciência e Engenharia Campus de Itapeva Unesp, Profa. Dra. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ciências e Tecnologia / Instituto de Ciências e Engenharia do Campus de Itapeva da Unesp, Prof. Dr. JULIANO FIORELLI (Participação Virtual) do(a) Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. MARILIA DA SILVA BERTOLINI

AGRADECIMENTOS

À minha família, por me proporcionar amor, educação e oportunidades para alcançar meus objetivos, acreditando sempre que a educação é o melhor caminho.

À Deus, pelo amor, sabedoria e toda a força para continuar sendo minha melhor versão.

À prof.^a Dra. Marília da Silva Bertolini pela orientação, pela confiança, pelos conhecimentos cedidos, amizade, pelo exemplar profissionalismo e por todos os ensinamentos proporcionados.

Ao prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza, por sua contribuição através da experiência na área de resíduos sólidos.

Ao prof. Dr. Juliano Fiorelli, do Laboratório de Construções e Ambiente, FZEA/USP, em Pirassununga – SP, pela colaboração na utilização do equipamento DTC – 300 Model 2022.

Prof. Dr. Francisco Antônio Rocco Lahr, pelo uso de equipamento do LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras) /EESC -USP, em São Carlos – SP.

A todos os professores e professoras por inspirar alunos como eu, proporcionando caminhos para educação e conhecimentos.

À empresa Eucatex, unidade de Chapas em Salto – SP, pela oportunidade de atuação profissional como Engenheiro de Métodos e Processos Trainee e incentivo em continuar me desenvolvendo por meio do estudo.

À empresa Eucatex, unidade de Botucatu – SP, pela doação das partículas de madeira de eucalipto.

À Engenheira Doutora Fernanda Cristina Pierre, pela parceria na doação das partículas de madeira de eucalipto.

À empresa Imperveg, pela doação do adesivo poliuretano à base de mamona, utilizado neste trabalho.

À Unesp de Itapeva, por toda infraestrutura e seus profissionais que contribuíram no projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Unesp de Bauru, por todo suporte e infraestrutura, com excelentes profissionais, professores e mentores que contribuíram com ensinamentos.

À Capes pela bolsa de desenvolvimento social disponibilizada para o projeto.

RESUMO

Atualmente, questões ambientais têm sido um tema encontrado frequentemente nas discussões mundiais, no que tange o reaproveitamento, reciclagem, coleta seletiva, redução de resíduos em suas origens, entre outros aspectos que contribuem para a proteção do meio ambiente. Neste aspecto, tem sido crescente a busca por produtos sustentáveis, que aliem materiais alternativos, menor custo de produção e reduzido consumo de energia, melhorando a qualidade do meio ambiente. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo a produção e caracterização de painéis de partículas produzidos com madeira e poliestireno expandido (EPS) pós-consumo, contribuindo com o gerenciamento destes resíduos e com a obtenção de um novo produto de conceito sustentável. Os painéis foram produzidos com partículas industriais de madeira de eucalipto com duas composições granulométricas, onde as partículas maiores foram acondicionadas no núcleo enquanto as partículas finas foram acondicionadas na superfície do painel, além de resina poliuretana à base de óleo de mamona como adesivo e inclusão de poliestireno expandido (EPS) pós-consumo. O EPS foi proveniente de embalagens térmicas pós consumo processadas, sob forma de grânulos. Foram estudadas as quantidades de 12,5% e 25% de EPS adicionado, avaliando a influência destes teores nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos painéis obtidos. As caracterizações física e mecânica ocorreram conforme a NBR 14810 (2018), e condutividade térmica, de acordo com a norma ASTM E1530 (2011). As amostras também foram analisadas quanto à estabilidade térmica, por meio de termogravimetria (TGA), e sua microestrutura por MEV, para verificação da interação entre madeira-EPS. Como resultados, os painéis apresentaram desempenho físico, mecânico e térmico condizentes com as normas e literaturas da área. As micrografias mostraram a interação satisfatória dos materiais utilizados para suas respectivas funções na composição dos painéis. O ensaio termogravimétrico revelou boa estabilidade térmica dos compósitos, demonstrando a viabilidade de produção destes painéis em conjunto com materiais mais sensíveis a elevadas temperaturas, como o EPS.

Palavras-chave: Painéis de partículas de madeira. Poliestireno expandido. Resíduo pós-consumo. Propriedades térmicas.

ABSTRACT

Currently, environmental issues have been a topic frequently found in global discussions, regarding reuse, recycling, selective collection, reduction of waste at its origins, among other aspects that contribute to protecting the environment. In this aspect, there has been a growing search for sustainable products, which combine alternative materials, lower production costs and reduced energy consumption, improving the quality of the environment. In this context, this work aimed to produce and characterize particle panels produced with wood and post-consumer expanded polystyrene (EPS), contributing to the management of this waste and obtaining a new product with a sustainable concept. The panels were produced with industrial eucalyptus wood particles with two granulometric compositions, where the larger particles were packed into the core while the fine particles were packed into the surface of the panel, in addition to polyurethane resin based on castor oil as an adhesive and inclusion of polystyrene. post-consumer expanded (EPS). The EPS came from processed post-consumer thermal packaging, in the form of granules. The amounts of 12.5% and 25% of added EPS were studied, evaluating the influence of these levels on the physical, mechanical and thermal properties of the panels obtained. The physical and mechanical characterizations occurred in accordance with NBR 14810 (2018), and thermal conductivity, in accordance with ASTM E1530 (2011). The samples were also analyzed for thermal stability, using thermogravimetry (TGA), and their microstructure using SEM, to verify the interaction between wood and EPS. As a result, the panels presented physical, mechanical and thermal performance consistent with standards and literature in the area. The micrographs showed the satisfactory interaction of the materials used for their respective functions in the composition of the panels. The thermogravimetric test revealed good thermal stability of the composites, demonstrating the viability of producing these panels in conjunction with materials more sensitive to high temperatures, such as EPS.

Keywords: Wood particle panels. Expanded polystyrene. Post-consumer waste. Thermal properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de produção de madeira.....	16
Figura 2 - Ciclo produtivo de painéis de partículas de madeira.	22
Figura 3 – Fluxo de pesquisa.....	24
Figura 4 - Pérolas de poliestireno expandido	29
Figura 5 - Faixa de condutividade térmica dos materiais aplicados em temperatura ambiente.....	39
Figura 6 – Partículas finas e grossas de eucalipto e partículas de EPS	45
Figura 7 – Resina bicomponente poliuretana a base de óleo de mamona	45
Figura 8 – Modo de produção e acondicionamento das partículas de madeira e EPS.	46
Figura 9 – Formação do colchão de partículas e colchões com 0% EPS, 12,5% EPS e 25% EPS, respectivamente.	46
Figura 10 – Painel de partículas após a prensagem a quente.....	47
Figura 11 – Painéis esquadrejados.....	47
Figura 12 – Agitador eletromecânico de peneiras	48
Figura 13 - Amostras de painéis T1, T2 e T3 para o ensaio MEV	49
Figura 14 - Equipamento Leo 440 para ensaio de MEV	50
Figura 15 - Moinho martelo.....	51
Figura 16 – Material utilizado para ensaio de TG e DSC	51
Figura 17 - Analisador termogravimétrico TGA/DSC2	52
Figura 18 - Plano de corte dos corpos de prova.	54
Figura 19 – Dimensões do corpo de prova de acordo com a ABNT.....	55
Figura 20 – Estufa e forma de acomodação de corpos de prova para o ensaio.	56
Figura 21 – Ensaio de resistência à flexão e módulo de elasticidade e corpos de prova.	59
Figura 22 – Ensaio de resistência à tração perpendicular e corpo de prova.	60
Figura 23 – Ensaio de arrancamento de parafuso na superfície e corpo de prova.	61
Figura 24 – Ensaio de arrancamento de parafuso no topo e corpo de prova.	61
Figura 25 – Corpos de prova e ensaio de condutividade térmica.	62
Figura 26 – imagens de MEV com visão geral da estrutura da madeira: (a) T1 – estrutura da madeira; (b) T2 – região de ruptura da partícula de madeira; (c) T3 – estrutura da madeira com vazio.....	66

Figura 27 - imagens de MEV com destaque da resina sob as partículas de madeira (setas vermelhas): (a) T3 – pontos característicos da resina; (b) ampliação da imagem “a”; (c) T3 – estrutura da madeira destacada pelo círculo e pontos de resina; (d) ampliação da imagem “c”.	68
Figura 28 – imagem de MEV com visão da estrutura da madeira, EPS e resina.	69
Figura 29 – imagem de MEV com visão da estrutura do EPS.	69
Figura 30 - Curva geral de desenvolvimento de incêndio	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais.....	40
Tabela 2 - Etapas e variáveis das amostras estudadas neste trabalho.....	43
Tabela 3 - Corpos de prova: dimensões e quantidades.....	53
Tabela 4 - Distribuição granulométrica das partículas de madeira e EPS.....	63
Tabela 5 - Intervalo de temperatura e perda de massa das curvas TGA.	73
Tabela 6 - Requisitos normativos.	76
Tabela 7 - Propriedades físicas: Densidade e teor de umidade.	77
Tabela 8 - Propriedades físicas: Inchamento em espessura e Absorção de água.	78
Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos painéis: MOR, MOE e RTP.	80
Tabela 10 - Propriedades mecânicas: arrancamento de parafuso na superfície e no topo.....	82
Tabela 11 - Condutividade térmica das amostras 2ª etapa.	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Principais produções de painéis de madeira em 2019 e 2020.....	19
Gráfico 2 – Produção de painéis de partículas por continente.	19
Gráfico 3 – Produção de painéis de partículas e MDF/HDF no Brasil e América do Sul.	20
Gráfico 4 - Produção de documentos por ano	25
Gráfico 5 - Maiores <i>CiteScore</i> da base de dados Scopus.	26
Gráfico 6 - Índices SJR e número de citações para os cinco principais periódicos.	26
Gráfico 7 - Principais autores que publicam sobre painéis de partículas e resíduos.	27
Gráfico 8 - Principais instituições que publicam sobre painéis de partículas e resíduos.	28
Gráfico 9 – Resíduos plásticos reciclados na cidade de Bauru – SP.....	33
Gráfico 10 – EPS comercializado em Mogi Guaçu.....	34
Gráfico 11 - Distribuição granulométrica em formato radar	63
Gráfico 12 - Curva TGA/DSC painel 100% madeira (tratamento 1).	71
Gráfico 13 - Curva TGA/DSC painel com 25% EPS (tratamento 3).	72
Gráfico 14 - Curva TGA/DSC poliestireno expandido puro.	72

LISTA DE ABREVIATURAS

RIO - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

COP - Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

ONU – Organização das Nações Unidas

MDP – *Medium Density Particleboard*

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

EPS – Poliestireno expandido

SNIF – Sistema Nacional de Informações Florestais

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

NBR – Norma Brasileira

EGP - *Edge Glued Panel*

OSB – Oriented Strand Board

MDF – *medium density fiberboard*

HDF – *high density fiberboard*

SDF – *super density fiberboard*

PUR – *poliuretano*

PIR – *poliisocianurato*

ANSI - *American National Standards Institute*

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

EUA – Estados Unidos da América

MOR – Módulo de Resistência à Flexão Estática

MOE – Módulo de Elasticidade

TP – Adesão Interna

SJR - *Scientific Journal Rankings*

USP – Universidade de São Paulo

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

UFLA – Universidade Federal de Lavras

UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

UNESPAR – Universidade Estadual do Paraná

CFCs – Clorofluorcarbonetos

CAN – Consumo Aparente Nacional

PET – Politereftalato de Etileno

ASCAM – Associação dos Catadores de Materiais Recicláveis de Bauru e Região

SEMMA – Secretaria Municipal do Meio Ambiente

ASTM – American Society for Testing and Materials

BS EN - British Standard European Norm

GB - National Standard of the People's Republic China

EG – Grafite Expansível

MPP – Polifosfato de Melamina

JIS A – Norma Industrial Japonesa para Aglomerado

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

ICE – Instituto de Ciência e Engenharia

IQSC – Instituto de Química de São Carlos

TG/TGA – Análises Termogravimétricas

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

LaMEM – Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

CPs – Corpos de Prova

D – Densidade

TU – Teor de Umidade

IE – Inchamento em Espessura

AA – Absorção de Água

RTP – Resistência a Tração Perpendicular

AR – Resistência ao Arrancamento de Parafusos

AR-S – Resistência ao Arrancamento de Parafusos na Superfície

AR-T – Resistência ao Arrancamento de Parafusos no Topo

FZEA – Laboratório de Construções e Ambiente

LOI – Índice Limite de Oxigênio

EUMEPS – *Association for European Manufacturers of Expanded Polystyrene*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Madeira e seus derivados	15
3.2 Painéis de madeira.....	17
3.3 Panorama atual sobre resíduos no contexto de painéis de partículas	23
3.3.1 Metodologia para pesquisa bibliográfica	23
3.3.2 Análise da literatura	24
3.4 Poliestireno Expandido (EPS)	28
3.4.1 O poliestireno expandido	28
3.4.2 Gerenciamento de resíduos e o cenário dos resíduos de EPS	30
3.4.3 Trabalhos sobre aproveitamento de resíduos de EPS em compósitos.	35
3.5 Propriedades térmicas nos materiais	37
3.6 Considerações com base na Revisão de Literatura	42
4 MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 Etapas deste trabalho	43
4.2 Produção dos painéis de partículas.....	44
4.3 Caracterização dos painéis e das partículas de madeira e poliestireno expandido	48
4.3.1 Análise granulométrica	48
4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – painéis de partículas.....	49
4.3.3 Análises termogravimétricas (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC)	50
4.3.4 Propriedades físicas e mecânicas	52
4.3.4.1 Densidade (D)	54
4.3.4.2 Teor de umidade (TU).....	55

4.3.4.3 Inchamento em espessura (IE)	56
4.3.4.4 Absorção de água (AA).....	57
4.3.4.5 Resistência à flexão estática (MOR) e módulo de elasticidade (MOE)....	58
4.3.4.6 Resistência a tração perpendicular (RTP)	59
4.3.4.7 Resistência ao arrancamento de parafusos (AR).....	60
4.4 Condutividade térmica dos painéis	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1 Caracterização dos painéis de partículas de madeira e poliestireno expandido	63
5.1.1 Análise granulométrica	63
5.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – painéis de partículas.....	65
5.1.3 Análises termogravimétricas (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC)	71
5.2 Propriedades físicas e mecânicas.....	76
5.3 Segunda etapa – Condutividade térmica dos painéis	83
6 CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o meio ambiente foi um tema encontrado frequentemente nas discussões mundiais, conferências como a RIO 92, RIO + 20, COP26 e COP27 discutiram tópicos sobre a maximização do reaproveitamento, reciclagem, coleta seletiva, redução de resíduos em suas origens, mudanças climáticas, entre outros aspectos que contribuem para a proteção do meio ambiente. Neste aspecto, tem sido crescente a busca por produtos sustentáveis, intensificando as pesquisas sobre materiais alternativos que proporcionam um custo de produção reduzido atrelado a um menor consumo de energia, melhorando a qualidade do meio ambiente (ONU, 2021; ONU, 2022; TREVISAN, 2021).

O setor da construção civil representa a maior indústria em utilização de recursos e geração de resíduos, entre os recursos utilizados está a madeira (ROSE e STEGEMANN, 2018). A madeira vem sendo utilizada há muito tempo na construção de casas, compondo telhados, forros, paredes e pisos, fato que contribuiu para desenvolvimento industrial a partir deste material (BABATUNDE et al., 2020; ARAUJO, 2020). Entretanto, a transformação mecânica da madeira bruta em produto comercial proporciona grande geração de resíduos, contribuindo para aumento da pressão ambiental sobre a utilização destes recursos (VASCONCELLOS, 2020).

O uso indiscriminado da madeira fez com que alternativas de utilização fossem desenvolvidas, como a produção de painéis de madeira reconstituída, tecnologia que compreende a redução de perdas de material, protegendo as florestas por meio do uso de recursos de forma mais eficiente, e com qualidade igual ou superior a madeira maciça. Da mesma forma que os painéis, novas práticas relacionadas a madeira industrial foram empregadas, como a utilização de madeiras de reflorestamento. Esta técnica é composta por espécies de crescimento rápido, como as madeiras de pinus e eucalipto, que surgiram como o objetivo de suprir as demandas do mercado por meio de uma madeira certificada, evitando a extração não legalizada e de madeiras protegidas pela lei (MÜZEL, 2013; GILIO, 2020; TREVISAN, 2021; UFSC, 2022).

A tecnologia para produção de painéis de madeira reconstituída ou de madeira aglomerada surgiu a partir de uma necessidade durante a Segunda Guerra Mundial, pela Alemanha, onde houve a escassez da madeira maciça e, como alternativa, iniciou-se o uso de resíduos para produção de painéis de madeira aglomerada propondo substituir as

características da madeira maciça com outro produto. Os painéis de madeira são produzidos através da união das partículas de madeira com o uso de resinas, que se consolidam quando aplicados a um determinado calor e pressão. No Brasil, os painéis são fabricados com madeira de eucalipto ou pinus, madeiras de crescimento rápido, e a resina mais utilizada é composta por ureia formaldeído, componente que produz o gás formaldeído, com certa toxicidade ao ser humano e ao meio ambiente (IWAKIRI, 2005; GILIO, 2020; TREVISAN, 2021).

Os painéis de madeira possuem destaque no Brasil, onde seu consumo apresentou bastante crescimento na década de 1990, época que surgiram os principais tipos de painéis, como o painel de partículas de média densidade – *Medium Density Particleboard* (MDP) (BIAZUS et al., 2010). A partir disso, a produção aumentou e de acordo com a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2023), a produção mundial de painéis de partículas de madeira atingiu 110,25 milhões de m³ em 2022, onde o Brasil contribuiu com 3,47 milhões de m³.

A produção expressiva de painéis aglomerados de madeira se relaciona à vantagens sobre a madeira maciça, como a flexibilidade de dimensões, eliminação do efeito da anisotropia da madeira e de elementos responsáveis por uma diminuição de resistência no produto final, entre outras. O fato de haver o controle do modo de produção também é um contribuinte para propriedades superiores. Estes painéis também podem ser fabricados juntamente com materiais de outras origens, podendo melhorar propriedades específicas, de acordo com a combinação e tipos de materiais utilizados. Devido a esse fato, o setor de construção civil é amplamente beneficiado com suas diversas possibilidades de aplicações, como a produção e aplicação de painéis compostos por materiais porosos, absorventes de som ou isolantes térmicos, como poliuretanos, lã de vidro e poliestireno expandido (EPS), contribuindo para um desempenho termoacústico mais eficiente (GUIMARÃES, 2008; MORESCHI, 2010a).

Desta forma, a reutilização de resíduos é oportuna quando o tema é painéis de partículas, visto que a união de processos produtivos que tem como objetivo agregar valor à custos menores e resíduos, garantindo valorização dos rejeitos, contribuindo com a diminuição do consumo e, conseqüentemente, extração de recursos naturais, colabora com o desenvolvimento sustentável, juntamente com o uso de outros insumos de menor impacto em sua fabricação, como as resinas parcialmente derivadas de biomassa (BERTOLINI, 2014). Com isso, faz-se fundamental o incentivo de práticas como a reciclagem de materiais residuais na produção de painéis, entre eles, os resíduos de poliestireno expandido (EPS) pós-consumo, considerando principalmente o elevado volume relacionado a quantidade utilizada deste

material que, em 2021, registrou um consumo aparente nacional de 129,5 mil toneladas. O EPS é um polímero reciclável com grande volume de produção, porém não possui decomposição natural ou simples, podendo se tornar prejudicial ao meio ambiente (ACEPE, 2022; ABIQUIM, 2023).

Em virtude disso, o presente trabalho propõe a produção de painéis com partículas industriais de madeira de eucalipto, resina poliuretana a base de óleo de mamona e resíduos de EPS pós-consumo, analisando a influência da configuração do painel e da quantidade de EPS nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas destes produtos.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi a proposta de reutilização de resíduos de EPS pós-consumo por meio da produção de ecopainéis de partículas de madeira, contribuindo para o aumento do valor agregado e disposição ambientalmente adequada deste material.

Os objetivos específicos foram:

- Análise do efeito da adição de EPS no painel (dispersos no núcleo – 12,5% e 25,0%) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis;
- Avaliação da influência do EPS (12,5% e 25,0%) na condutividade térmica dos painéis de partículas produzidos;
- Análises da microestrutura dos painéis e da estabilidade térmica dos materiais utilizados e dos painéis produzidos.
- Análise dos resultados com base na literatura e normas de referência no segmento de painéis de partículas de madeira.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os tópicos a seguir apresentam a revisão de literatura sobre o assunto abordado.

3.1 Madeira e seus derivados

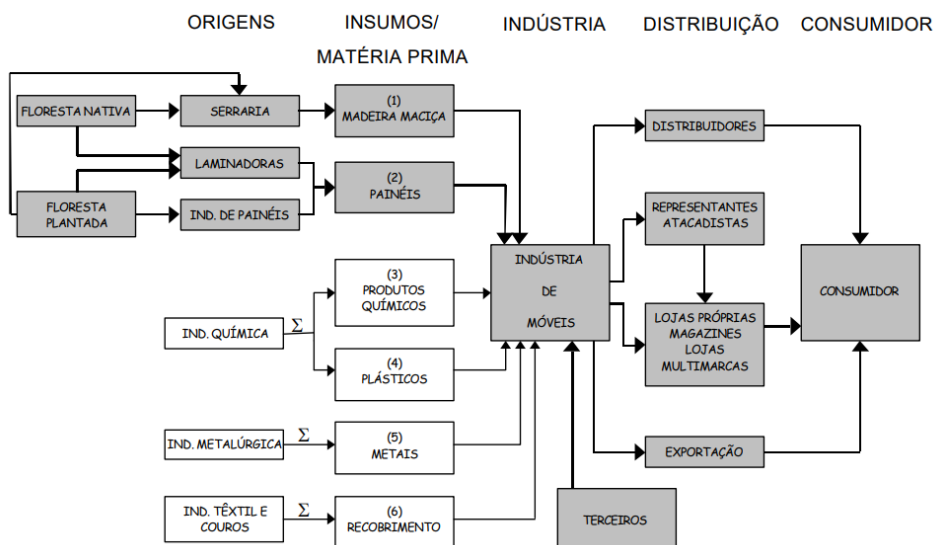
De acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais (2019) e a Indústria Brasileira de Árvores (2021), o Brasil é contemplado com uma grande área florestal, representando 58,5% do território, com 497.962.509 hectares de extensão. As florestas podem ser divididas entre nativas ou plantadas para fins industriais, representando 98% e 2%, respectivamente.

Os estados que atuam como os principais produtores de florestas plantadas são Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina. Em 2020, foram plantadas 9,55 milhões de hectares de árvores, entre as espécies mais cultivadas estão o eucalipto, compondo 78% da área total com 7,47 milhões de hectares, seguido por madeira de pinus, com 18% e correspondendo a 1,7 milhão de hectares. Outras espécies como seringueira, teca, acácia e paricá são encontradas, representando 382 mil hectares plantados (IBA, 2021).

O setor de produção de árvores tem sido bastante significativo para o Brasil, fazendo com que houvesse um aumento na produção bruta de árvores em 17,6% do ano de 2019 para 2020. Os principais responsáveis por esse crescimento são os setores de papel e celulose, painéis e pisos laminados, serrados e compensados, entre outros. O Brasil assumiu o lugar de líder em exportação no ano 2020 para celulose, com US\$6,0 bilhões de dólares (IBA, 2021). A produção de celulose atingiu seu maior valor em 2021 com 22,51 milhões de toneladas, assim como o consumo aparente brasileiro de painéis de madeira, atingindo 8,26 milhões de m³ em 2021 (IBA, 2022).

A Figura 1 apresenta um fluxograma sobre a cadeia produtiva da madeira, compreendendo as etapas iniciais, como as origens da floresta, os insumos e matérias primas, até etapas finais, representando as etapas de distribuição para o consumidor, com algumas possibilidades de utilização.

Figura 1 - Fluxo de produção de madeira



Fonte: Ferreira (2002).

Uma alternativa para destinação destes resíduos e materiais de origens diversas seriam as indústrias de painéis de madeira. De acordo com Iwakiri et al. (2000), os painéis de madeira aglomerada são uma das alternativas, no contexto de produzir algo com maior valor agregado. Corroborando com esta ideia, Zau et al. (2014), expõe em seu estudo que por meio do conhecimento das quantidades, qualidades e possibilidades de utilizações deste material, podem surgir alternativas, como a produção de painéis, estes que são ecologicamente corretos, pois conservam os recursos naturais por meio da transformação de resíduos em produtos úteis e com maior valor agregado.

A madeira possui algumas características bastante interessantes que explicam as inúmeras aplicações conforme destacado anteriormente, como a sua condutividade térmica ($\lambda - W/(m \cdot K)$), relativamente baixa devido a sua estrutura porosa e a presença de ar internamente. Moreschi (2010b) cita a madeira como um bom isolante e com $\lambda = 0,12$, enquanto a chapa de aglomerado pode apresentar um valor entre 0,07 e 0,12. A norma NBR 15220 (2005) também cita um valor para a madeira, sendo $\lambda = 0,17$ para aglomerados de partículas com densidade até 750 kg/m³. Em seu trabalho, Moreschi (2010b) também relata que a madeira com 0% de umidade possui um calor específico de 0,324, maior que alguns materiais, como ferro e aço, com 0,1, em que o calor específico representa a energia necessária para aumentar em 1°C a quantidade de 1kg de material.

As propriedades acústicas da madeira também são notórias a bastante tempo, pois é um material utilizado na fabricação de instrumentos musicais e nos revestimentos de edificações. Como comparação, a madeira apresenta um grau de absorção a 120 Hz de 0,1, enquanto as chapas isolantes apresentam valores entre 0,12 e 0,30 e cimento 0,1. Por outra perspectiva, a 2.000 Hz, a madeira apresenta um grau de absorção de 0,08, enquanto chapas isolantes apresentam valores entre 0,20 e 0,75 e cimento 0,02 (MORESCHI, 2010b).

Dentre todas as propriedades analisadas, Moreschi (2012) continua seus estudos sobre madeira e relata que a densidade é uma das propriedades mais importantes, pois quanto mais pesada for a madeira, mais resistente, elástica e dura ela será do que as mais leves, porém, são mais difíceis de trabalhar e podem variar mais. A umidade pode influenciar a densidade da madeira, e ainda, a falta de controle dessa propriedade pode acarretar arqueamentos, empenamentos, contração e inchamento volumétrico, como exemplos. As propriedades mecânicas de resistência também são afetadas, influenciando a trabalhabilidade, poder calorífico, suscetibilidade a fungos, entre outras. Com isso, tendo o controle das propriedades, ao utilizar a madeira em construções existe a colaboração com a sustentabilidade, visto que há a diminuição de desperdícios de materiais em larga escala quando comparada ao ciclo de vida de uma construção de alvenaria (SBI, 2017).

3.2 Painéis de madeira

São encontrados dois tipos de painéis de madeira no mercado, os compostos por madeira processada mecanicamente e de madeira reconstituída. Os painéis de madeira processada mecanicamente podem ser caracterizados como compensados, laminados de madeira e os EGP – *Edge Glued Panel* (painéis colados lateralmente). Estes tipos de painéis podem ser produzidos com camadas de lamelas ou ripas de madeira maciça, podendo ser aplicados no ramo moveleiro, embalagens, pisos, componentes estruturais e coberturas de construções como vigas em formato de “I” (PEDROSA et al., 2005; BIAZUS et al., 2010). Por outro lado, Biazus et al. (2010) define que os painéis de madeira reconstituída podem ser encontrados nas formas de OSB – *oriented strand board* (chapa de partículas *strands* de madeira orientada), MDP – *medium density particleboard* (painel de partículas de média densidade), MDF – *medium density fiberboard* (painel de fibras de média densidade), HDF – *high density fiberboard* (painel de fibras de alta densidade), SDF – *super density fiberboard*

(painel de fibras de super densidade), chapas isolantes de temperatura (painéis isotérmicos) e comumente produzidos juntamente com poliestireno expandido (EPS), poliuretano (PUR), poliisocianurato (PIR) e outros componentes.

Alguns fatores impulsionadores do consumo de painéis de madeira podem ser apresentados:

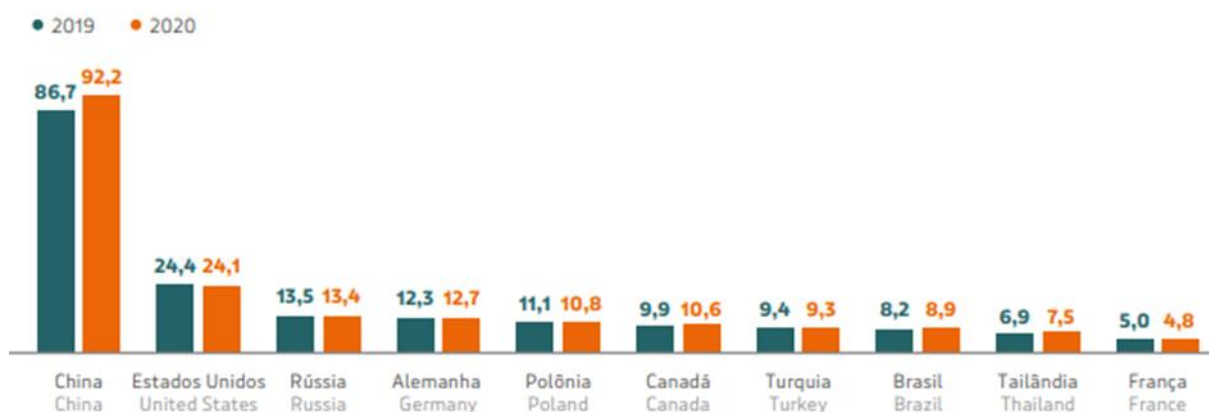
- o crescente custo da madeira maciça, contribuindo para busca de alternativas;
- Renda dos consumidores, impulsionando o setor moveleiro e de construção civil;
- Modernização fabril;
- Possibilidade de obtenção de propriedades em direções preferenciais (MATTOS et al., 2008).

Os painéis de partículas de madeira apresentam algumas vantagens em relação a madeira maciça, sendo elas:

- Fabricação de um produto com menor variação dimensional;
- Melhoramento de propriedades de resistência física, mecânica, biodeterioração e diversas outras de acordo com a intenção e tipos de materiais adicionados;
- Possibilidade de utilização de madeira de reflorestamento e rápido crescimento, garantindo um uso mais sustentável;
- Redução de desperdícios;
- Redução de características e defeitos comuns na madeira, como anisotropia e heterogeneidade (MATTOS et al., 2008).

Devido a suas características, os painéis de madeira são produzidos no mundo todo, para diversas finalidades. O Gráfico 1 apresenta a produção mundial de painéis de madeira no ano de 2020. Pode-se observar que a China tem sido o país com a maior produção de painéis, atingindo o valor de 92,2 milhões de m³, seguido pelos EUA, enquanto o Brasil se encontra na oitava posição, com 8,9 milhões de m³.

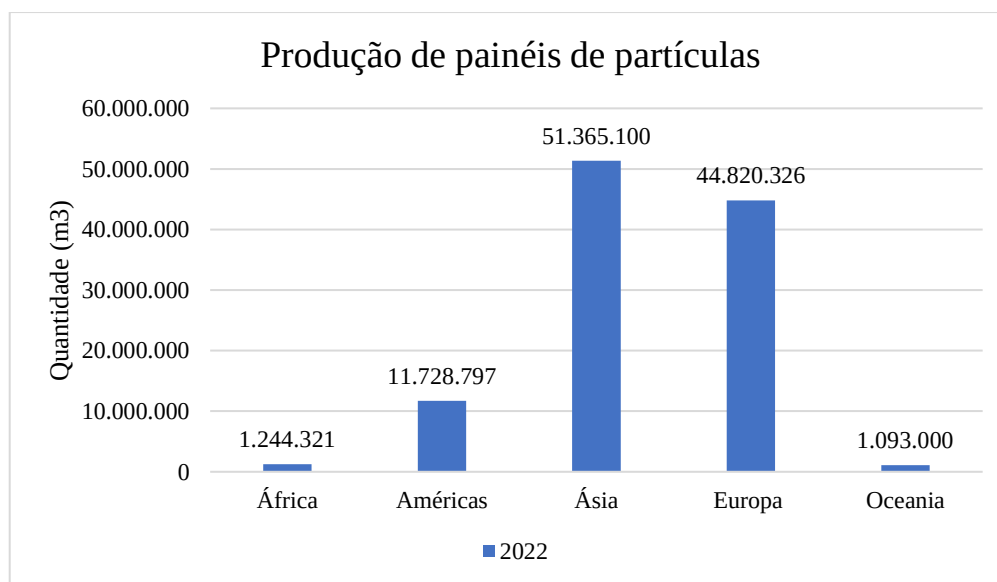
Gráfico 1 - Principais produções de painéis de madeira em 2019 e 2020.



Fonte: IBA (2021) adaptado de FAO.

Passando de uma visão geral de painéis de madeira para painéis de partículas, verifica-se que a produção mundial de painéis de partículas totalizou 110,25 milhões de m³ em 2022. De acordo com o Gráfico 2, o principal continente produtor de painéis de partículas é a Ásia, continente que apresentou o maior crescimento em comparação com os demais, mais que dobrando sua produção em 12 anos, saindo 21,88 milhões em 2010 para 51,36 milhões de m³ em 2022. O segundo maior produtor é o continente europeu, com 44,82 milhões de m³ em 2022, seguido pelas américas, com 11,73 milhões de m³ (FAO, 2023).

Gráfico 2 – Produção de painéis de partículas por continente.

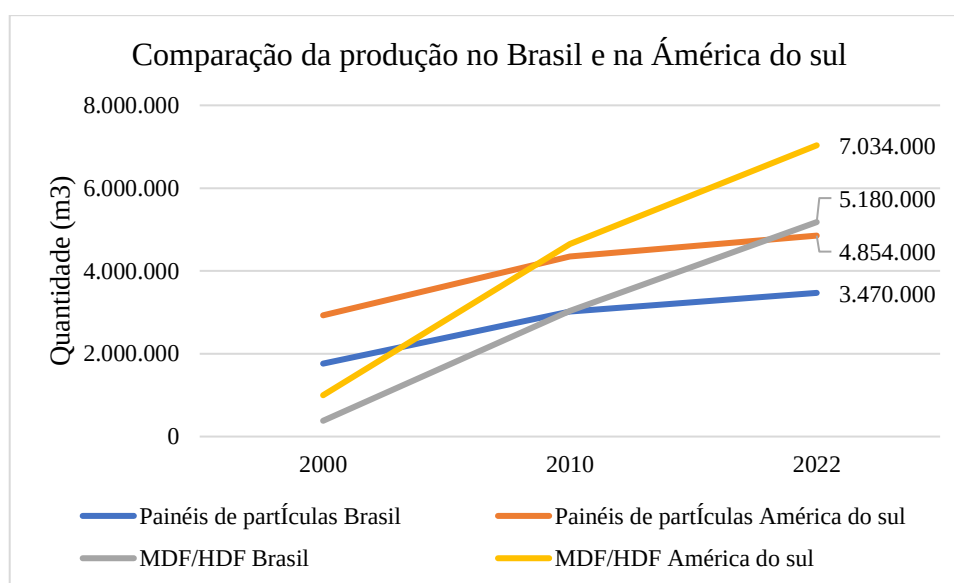


Fonte: FAO (2023).

Realizando uma análise mais próxima ao Brasil sobre a produção de painéis, como painéis de partículas e MDF e HDF na América do Sul, presente no Gráfico 3, nota-se que o Brasil é um grande contribuinte para o valor atingido pelo subcontinente americano com 3,47

milhões de m³ de painéis de partículas e de 4,85 milhões de m³ para MDF e HDF, ambos em 2022. É possível notar uma tendência de crescimento no Gráfico 3 e, na perspectiva do Brasil, observa-se que a quantidade produzida quase dobra com relação a produção de painéis de partículas e aumenta em mais de 13 vezes com relação a produção de MDF e HDF para o período analisado de 2000 a 2022, demonstrando o grande aumento no mercado brasileiro (FAO, 2023). De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2021), as indústrias de painéis de madeira se concentram nas regiões sul e sudeste do Brasil, contribuindo com 88% da produção de todo o país.

Gráfico 3 – Produção de painéis de partículas e MDF/HDF no Brasil e América do Sul.



Fonte: FAO (2023).

De acordo com o relatório anual da IBÁ (2022), as principais produtoras de painéis de partículas, MDP, MDF, entre outros, concentram-se no sul do Brasil. Entre as principais produtoras estão a Arauco do Brasil S.A., com uma de suas iniciativas o Bioforest, um centro de pesquisa inovador na América do Sul. Encontra-se também a Berneck S.A. Painéis e Serrados, com painéis de MDP e MDF. A Duratex S.A. focada na indústria moveleira com chapas de fibras Duratree. A Eucatex Indústria e Comércio Ltda, com a produção do Thin-HDF, MDF Eucafibra e MDF Lacca Metálica, além de diversos outros produtos inovadores. Fibraplac Painéis de Madeira S/A. e Greenplac Tecnologia também são influentes no setor e contribuem com a produção de painéis, além de diversas outras produtoras.

É notório que o mercado de painéis é promissor e, como isso, faz-se necessário entender um pouco mais sobre painéis e como são produzidos.

Painéis de madeira ou aglomerado, podem ser definidos como painéis produzidos com pequenas partículas de madeira ou materiais lignocelulósicos aglutinados por um agente orgânico juntamente com outros fatores importantes, como pressão, calor, umidade ou catalizador (FAO, 2019). A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2018) através da norma NBR 14810-1 e Iwakiri (2020) também contribuíram com uma definição, estabelecendo que um painel de partículas de madeira é constituído por partículas de madeira distribuídas de forma aleatória e aglutinadas por meio de uma resina sintética termofixa, que por meio da ação conjunta do calor e pressão, se consolidam.

Essas são algumas das definições mais atuais, entretanto, o conceito de painel de partículas, ou madeira aglomerada, surgiu na década de 40 durante a Segunda Guerra Mundial, na Alemanha, onde existia a escassez de recursos, entre eles a madeira maciça e, como solução foi a reutilização dos resíduos. Com isso, o painel de partículas foi caracterizado pela união das partículas de madeira por meio de um adesivo sintético (resina), sendo consolidado por meio da aplicação de pressão e calor em uma prensa térmica. Os painéis se mostraram como uma ótima alternativa de substituição da madeira maciça, visto que eles podiam ser produzidos com madeira de qualidade inferior ou até mesmo pelo aproveitamento de resíduos (IWAKIRI, 2005).

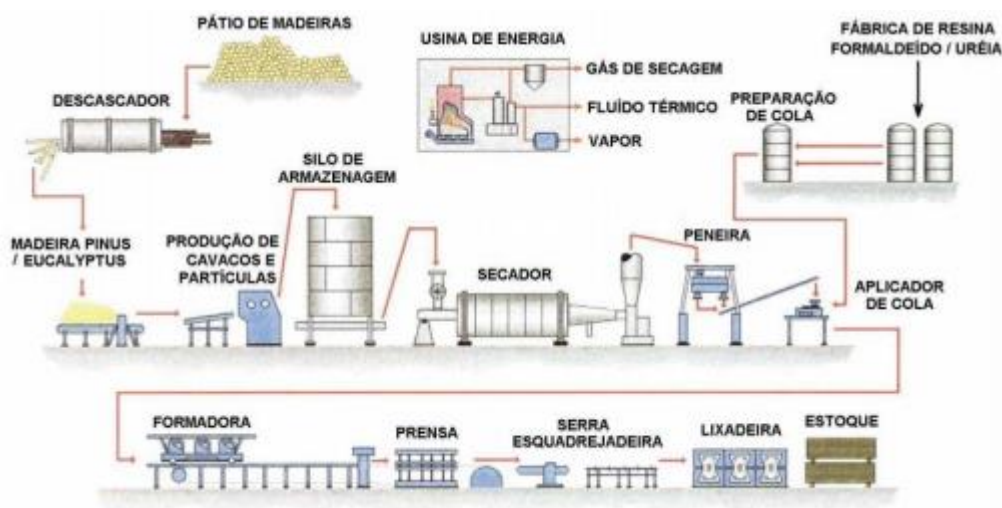
Em meados dos anos 60, os painéis de madeira aglomerada chegam ao Brasil, especificamente na cidade de Curitiba – PR. Na década de 90 há um grande passo para o avanço da tecnologia encontrada na indústria de painéis, o investimento em tecnologia fez com que as fabricas se modernizassem e substituíssem as prensas cíclicas por prensas contínuas, ampliando a capacidade fabril, reduzindo custos e estimulando o consumo de painéis. Esse avanço, tanto em tecnologia como no consumo, se deu pela conscientização do consumidor com relação a boa qualidade do material, mostrando ser possível aplicá-los na construção civil e na indústria moveleira (MATTOS et al., 2008; BIAZUS et al., 2010). Contribuindo com a ideia de qualidade do material, Souza et al. (2018) relata que com a intenção de trazer vantagens ambientais e econômicas para indústria, a reutilização de resíduos de madeira são capazes de agregar valor aos compósitos, apresentando uma finalidade mais adequada do que somente o descarte, sendo muitas vezes inadequado.

As normas americanas ANSI A208.1 (1999) e ANSI A208.1 (2016) dividem os painéis em três categorias quanto a densidade, sendo eles: *low density* (baixa densidade) –

densidade abaixo de 640 kg/m^3 ; *medium density* (média densidade) – densidade entre os valores de 640 kg/m^3 e 800 kg/m^3 ; e *high density* (alta densidade) – densidade acima de 800 kg/m^3 . Por outro lado, a norma NBR ABNT 14810-2 (2018) determina que painéis de média densidade (MDP) são aqueles que apresentam densidade superior a 551 kg/m^3 e inferior a 750 kg/m^3 .

Iwakiri (2005) define o ciclo produtivo e todos os componentes de um painel de partículas ou de madeira reconstituída necessários a fabricação e boa qualidade do produto. Desta forma, os painéis de partículas de madeira passam por algumas etapas, em que a primeira consiste em preparar as partículas que serão utilizadas como matéria prima realizando a produção de cavacos e partículas nas dimensões ideais. As partículas seguem para a armazenagem e, com o auxílio de uma peneira, é realizada a classificação, logo após ocorre a secagem das partículas que serão utilizadas. O adesivo é então aplicado, o qual é definido pela norma NBR ABNT 14810-1 (2013) como uma substância orgânica ou inorgânica utilizada com o intuito de aglutinar as partículas que irão compor o painel. Após a mistura do adesivo é formado o colchão de partículas por meio da pré-prensagem, etapas anteriores a prensagem a quente, etapa responsável pelo formato e as características pelas quais os painéis de partículas são conhecidos. A última etapa de produção está relacionada ao acabamento e cura do painel. A Figura 2 representa o fluxo no qual os materiais passam para produção de um painel de madeira reconstituída.

Figura 2 - Ciclo produtivo de painéis de partículas de madeira.



Fonte: Iwakiri (2005).

De acordo com a matéria prima utilizada e as características desejadas, é possível fabricar diversos tipos de painéis de partículas, sendo estes classificados de acordo com os

aspectos de suas propriedades físicas, mecânicas e demais propriedades, dependendo da finalidade para o qual o painel foi produzido. Os principais fatores físicos analisados estão relacionados com a densidade, comprimento, largura, espessura, teor de umidade e inchamento. Com relação as propriedades mecânicas, são verificados o módulo de resistência à flexão estática (MOR), módulo de elasticidade (MOE), adesão interna (TP) e arrancamento de parafuso (TREVISAN, 2021).

A norma NBR ABNT 14810-2 (2018) divide os tipos de painéis de MDP de acordo com as propriedades citadas e ao tipo de uso e ambiente. Como resultado dessa divisão há seis tipos de painéis, especificados como:

1. P2 – painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
2. P3 – painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
3. P4 – painéis estruturais para uso em condições secas;
4. P5 – painéis estruturais para uso em condições úmidas;
5. P6 – painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos;
6. P7 – painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes úmidos.

3.3 Panorama atual sobre resíduos no contexto de painéis de partículas

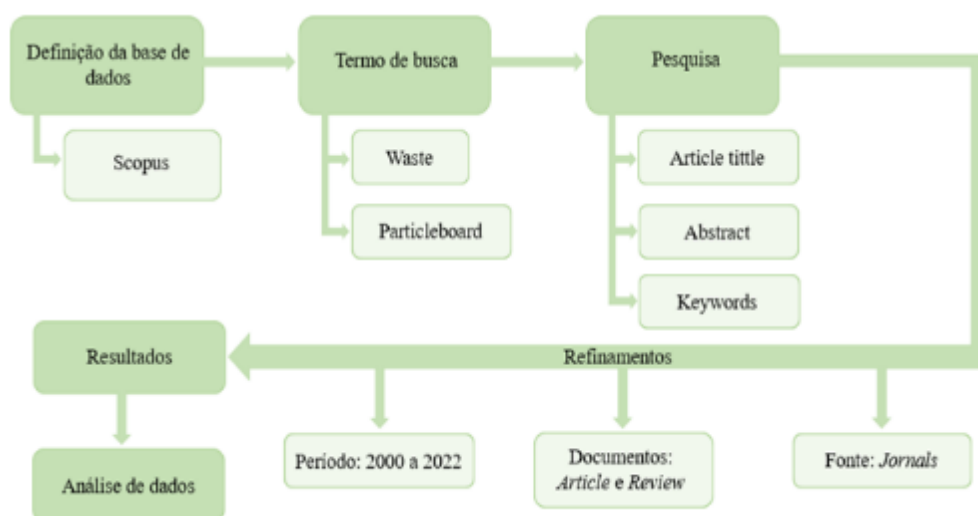
3.3.1 Metodologia para pesquisa bibliográfica

Com o intuito de traçar o panorama atual da pesquisa em painéis de partículas com a inserção de resíduos em sua composição, foi efetuado um estudo bibliométrico em contexto internacional e nacional análogo ao estudo realizado por Deus et al. (2015), o qual utiliza como base Yang et al. (2013a), Yang et al. (2013b) e Fu et al. (2010), estudos cujo tema é resíduos sólidos. Neste trabalho foi utilizado a base de dados Scopus da editora Elsevier, pois esta detém mais de 26.000 títulos de mais de 7.000 editoras presentes no mundo todo, abrangendo as mais diversas áreas do conhecimento, sendo referência de citação desde 1970 com mais 1.8 bilhões de citações. Outro aspecto importante que levou a escolha dessa base de dados foi a presença de mais periódicos brasileiros quando comparada a outras bases de dados bem-conceituadas (SCOPUS, 2022).

Os termos utilizados para pesquisa foram em inglês *waste* e *particleboard*, termos comumente usados para resíduos e painéis de partículas, respectivamente. Os termos foram

pesquisados no campo *article title* (título do artigo), *abstract* (resumo) e *Keywords* (palavras-chave), para o período contido entre os anos de 2000 e 2022, sem restrição de área de pesquisa. Importante citar que a análise foi realizada até dezembro do ano de 2022, podendo haver artigos da base de dados que ainda não foram inseridos. Algumas limitações foram impostas aos resultados, como sendo apenas artigos e revisões publicados em *journals* (Periódicos). Após todas essas determinações, os dados foram compilados e analisados. O fluxo de pesquisa para obtenção dos resultados pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxo de pesquisa.



Fonte: Próprio autor (2024).

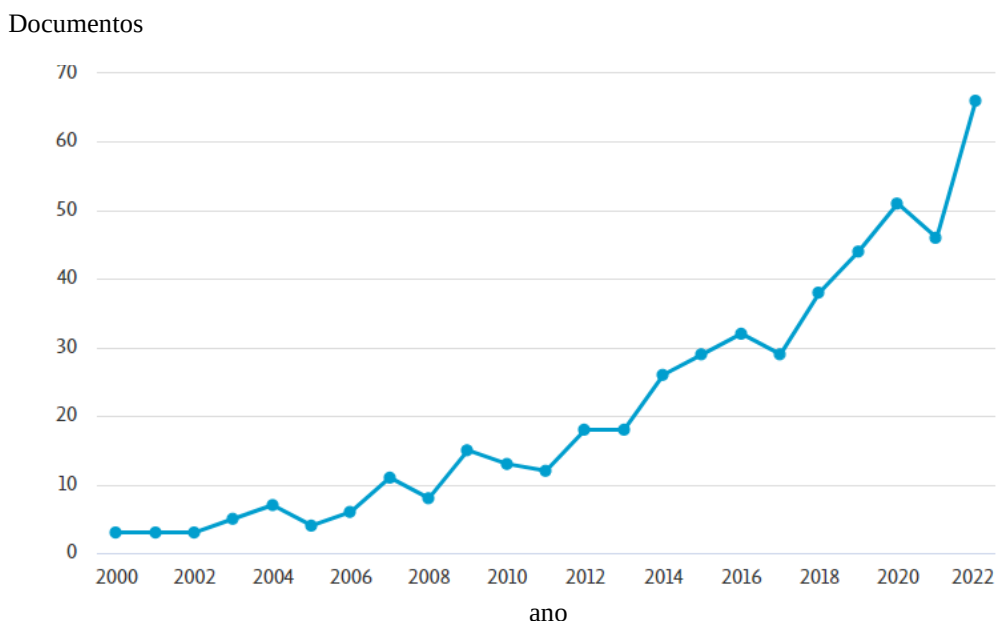
Os periódicos encontrados foram classificados por meio do cálculo do *CiteScore*, que é baseado no número de citações de documentos ao longo de um período de quatro anos, dividido pelo número de documentos indexados no Scopus e publicados nesse mesmo período. O índice SJR também foi utilizado, este que tem como objetivo mostrar o prestígio de uma revista, desta forma, o assunto, a qualidade e a reputação do periódico afetam o valor da citação.

3.3.2 Análise da literatura

Observando o período analisado, do ano 2000 ao ano 2022, observa-se uma pesquisa crescente relacionada ao tema de resíduos e painéis de partículas, fato que pode ser observado no Gráfico 4. Ainda de acordo com o Gráfico 4, é possível constatar que o número de publicações dobrou entre os anos de 2000 e 2007, o que acontece também entre 2008 e 2012 e, de 2012 até 2020, a produção triplicou, e em 2022 atingiu seu ápice, com 66 publicações. De

acordo com FAO (2023), a qual apresenta dados sobre a produção mundial, o setor de painéis de partículas também apresentou crescimento, porém, de forma mais suave, apresentando uma produção de aproximadamente 64,25 milhões de m³ para o ano de 2000 e chegando a 110,25 milhões de m³ para o ano de 2022.

Gráfico 4 - Produção de documentos por ano.

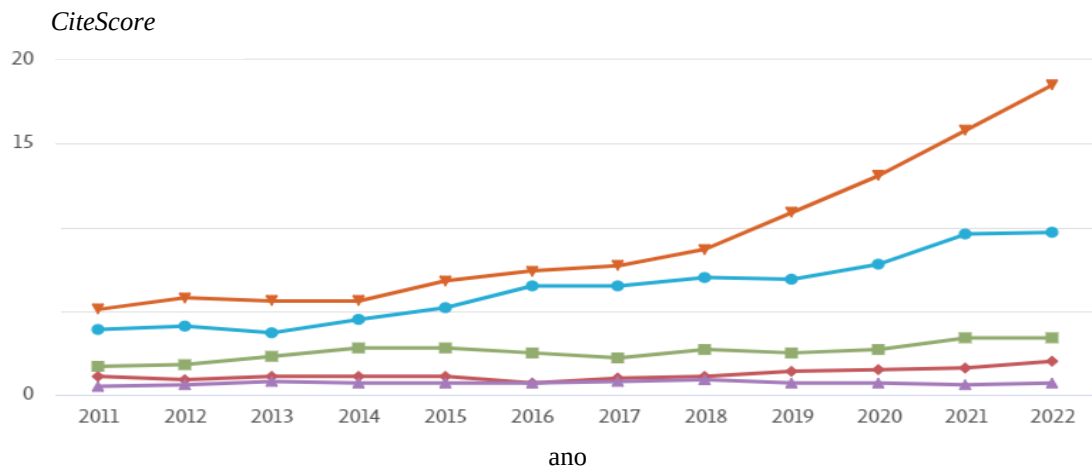


Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Não apenas a produção de painéis de partículas cresceu como também a produção de resíduos de madeira, apresentando o valor de 97,49 milhões de m³ no ano de 2000 e chegando à 240,98 milhões de m³ no ano de 2022 (FAO, 2023). Essa curva crescente também é encontrada na produção de trabalhos utilizando resíduos, algo que foi mostrado por Deus et al. (2015), os quais realizaram uma pesquisa bibliográfica na base de dados Scopus sobre resíduos sólidos em âmbito nacional e internacional e, observaram que a produção triplicou para o período contido entre os anos de 1993 e 2003, enquanto para o período entre 2003 e 2013 mais dobrou.

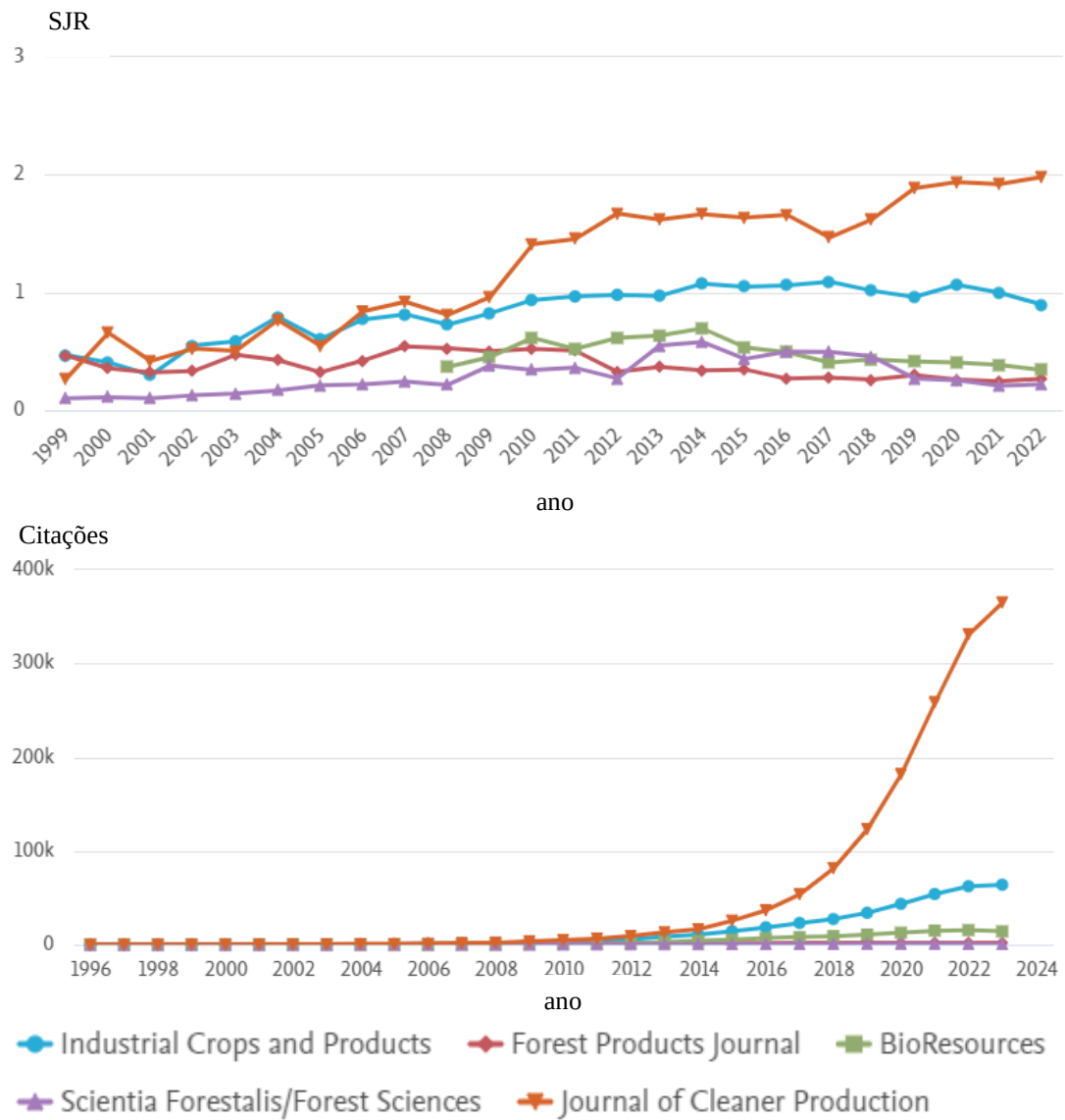
Ao analisar os índices de classificação dos periódicos, de acordo com o Gráfico 5 e Gráfico 6, é notório que o que periódico mais relevante, observando o *CiteScore*, é o *Journal of Cleaner Production*, chegando a um valor de 18,5 pontos em 2022, seguido pelos periódicos *Industrial Crops and Products*, com 9,7 pontos e *BioResources*, com 3,4 pontos. Tal fato pode ser justificado pela característica da pesquisa, ou seja, painéis de partículas são produtos em que a grande maioria das vezes são originários de madeira e destinados a construção de edificações, correspondendo ao setor de pesquisa dos periódicos.

Gráfico 5 - Maiores CiteScore da base de dados Scopus.



Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Gráfico 6 - Índices SJR e número de citações para os cinco principais periódicos.

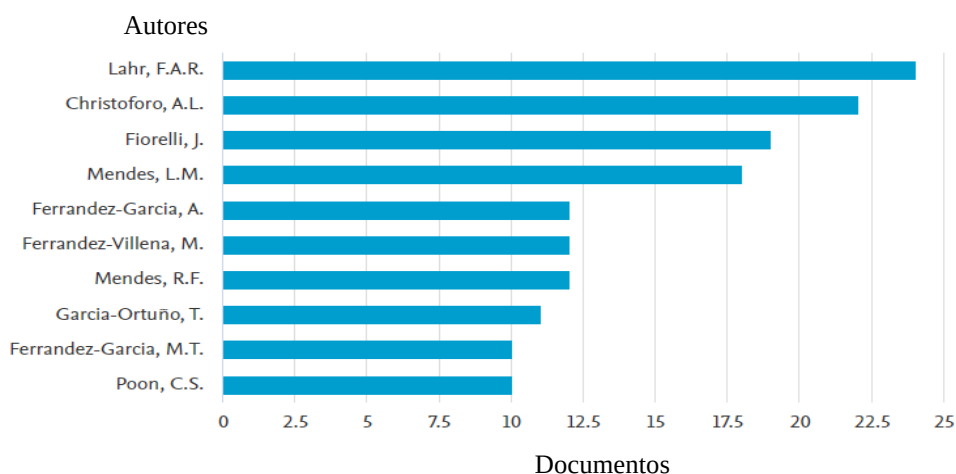


Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Não somete para o índice *CiteScore*, a mesma ordem de classificação acontece ao analisar o índice SJR, mostrando que o periódico com mais prestígio é o *Journal of Cleaner Production*. Como consequência desses dois índices, o número de vezes que os periódicos são citados é afetado, colocando mais uma vez o periódico *Journal of Cleaner Production* no topo da lista com o maior número de citações. Corroborando com as informações anteriores, Espuny et al. (2021) realizou uma pesquisa bibliográfica sobre gestão de resíduos sólidos dos mais diversos tipos e encontrou para o período contido entre 2005 e 2018 que o periódico *Journal of Cleaner Production* está na 7ª posição com 45 publicações, enquanto o periódico *Waste Management* alcançou a primeira colocação com 519 publicações, sendo também a mais citada e com índice H mais alto.

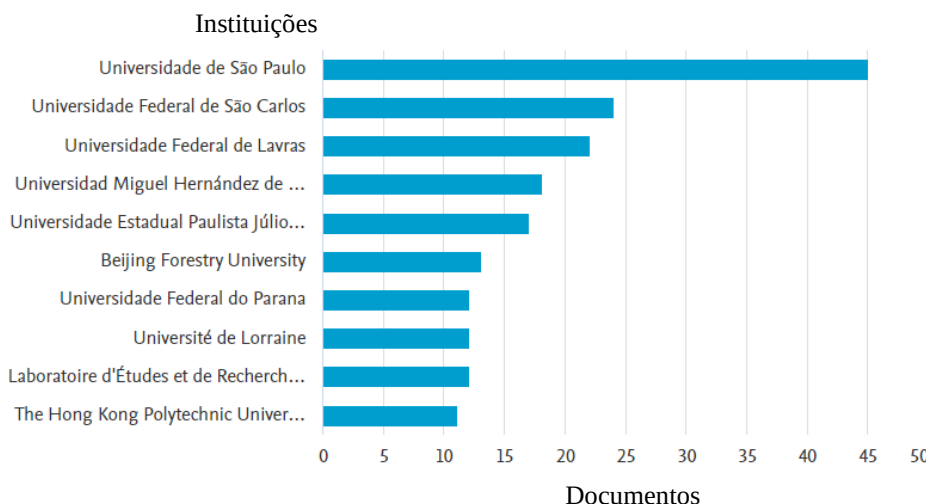
Ao analisar os principais influenciadores sobre o tema de resíduos e painéis de partículas (Gráfico 7) para o período estipulado (ano 2000 até 2022), percebe-se que o autor com mais publicações foi Lahr, F. A. R., com 24 publicações, seguido por Christoforo, A. L., com 22 publicações e Fiorelli, J., com 19 publicações. Vale ressaltar que os brasileiros se destacam em publicações nesse tema, onde os 3 principais autores que publicam são brasileiros. Este fato é confirmado ao observar o Gráfico 8, o qual contém as principais instituições que publicam, sendo metade instituições brasileiras. A Universidade de São Paulo (USP) está em 1º lugar com 45 publicações, seguida pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) em 2º lugar com 24 publicações, Universidade Federal de Lavras (UFLA) em 3º lugar, com 22 publicações, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) em 5º lugar com 17 publicações e Universidade Estadual do Paraná (UNESPAR) em 7º lugar com 12 publicações.

Gráfico 7 - Principais autores que publicam sobre painéis de partículas e resíduos.



Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Gráfico 8 - Principais instituições que publicam sobre painéis de partículas e resíduos.



Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

3.4 Poliestireno Expandido (EPS)

3.4.1 O poliestireno expandido

O poliestireno expandido (EPS) é um tipo de polímero produzido a partir do petróleo com, geralmente, 2% de material sólido enquanto o restante (98%) representa o ar interno. Devido a sua simples composição, somente com átomos de carbono, hidrogênio e ar, tornam ele um material atóxico, livre de gases CFCs (clorofluorcarbonetos) responsáveis pela destruição da camada de ozônio, apresenta boas propriedades de isolamento térmico e acústico, é flexível, leve e pode apresentar boa resistência mecânica de acordo com sua densidade e aplicação (COMISSÃO SETORIAL, 2020; ABRAPEX, 2021; ACEPE, 2022).

O EPS foi descoberto na década de 40 na Alemanha por dois químicos, Fritz Stasny e Karl Buchholz. Posteriormente, na década de 60, o EPS chegou no Brasil sendo uma marca registrada pela empresa Knauf Isopor, nomeando o produto como Isopor®. O material possui a característica de plástico celular rígido, sendo o resultado da polimerização de monômeros de estireno em cadeias longas por meio do gás pentano. Esse processo é responsável por produzir o poliestireno expansível, pequenas perolas de até 3 milímetros de diâmetro, as quais seguem para a etapa de expansão. Os grânulos de EPS são aquecidos com vapor, fazendo com que o agente expansível atue e amoleça o polímero, proporcionando a expansão em até 8 vezes o volume inicial. Após a maturação dos grânulos pré-espumados, há o acondicionamento em

moldes e o aquecimento com vapor para que ocorra maior expansão e o preenchimento por completo dos moldes pelo material, adquirindo sua leveza pela presença de ar. Durante esta etapa, a densidade do EPS pode reduzir em até 50 vezes, dependendo de sua aplicação e características desejadas. Exemplificando o poder de expansão do material, é possível encontrar entre 3 e 6 bilhões de células fechadas com ar em seu interior em apenas 1 m³ de material (DE KEER et al., 2017; ABRAPEX, 2021; ACEPE, 2022).

A Figura 4 mostra pérolas de EPS expandidas, estas que representam o produto em seu aspecto conhecido e podem ser destinadas a diversas aplicações.

Figura 4 - Pérolas de poliestireno expandido



Fonte: REFRATIL (2022).

O EPS é produzido com apenas 0,1% de todo o consumo de petróleo e seu processo de fabricação garante uma poluição reduzida, uma vez que os principais agentes são o pentano (baixo aquecimento global) e o vapor de água. Pelo fato do EPS ser constituído por apenas um polímero e sua pequena quantidade de material, ele pode ser reciclável e não representa riscos ao ambiente por ser inerte e inócuo (ACEPE, 2022).

Da mesma forma, porém levando em conta o polímero não expandido, o poliestireno, o qual representava em 2018 cerca de 7% da produção mundial de plásticos e, em 2019, sua produção alcançou mais de 368 milhões de toneladas (Zhong et al., 2022). Entre as diversas aplicações, o EPS é muito encontrado na construção civil devido as suas características de bom isolamento térmico por apresentar baixa condutividade térmica de 0,04 W/(m.K) (ABNT NBR 15220, 2005) e uma estrutura leve, sendo utilizado como material de preenchimento em sistemas isolantes de paredes, coberturas e em quaisquer tipos de obra, como rodovias e viadutos, até grandes edifícios e simples moradias, substituindo os elementos tradicionais para um melhor rendimento energético. Sua característica de baixo peso atrelada a

resistência ao impacto faz com que o EPS seja utilizado como enchimento em equipamentos de proteção individual, como capacetes. Por se tratar de um material impermeável, resistente a humidade, higiênico, inerte e resistente a compressão, o EPS é utilizado como embalagens de proteção e transporte para materiais sensíveis, como componentes eletrônicos ou eletrodomésticos, perfumaria, cerâmicos, entre outros. A performance térmica do EPS garante aplicações relacionadas a produtos mais sensíveis e que necessitem de cuidados específicos, como farmacêuticos, alimentos e até órgãos humanos, garantindo a integridade e condições ideais durante o transporte (ACEPE, 2022).

3.4.2 Gerenciamento de resíduos e o cenário dos resíduos de EPS

O gerenciamento de resíduos tem como principal objetivo garantir soluções para mitigar os efeitos negativos ao ambiente decorrentes de uma disposição final inadequada. À vista disso, o gerenciamento deve atuar em alguns aspectos, como a redução da geração, redução dos resíduos gerados, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final segura e adequada ao ambiente (INTAHPHUAK et al., 2017). Deste modo, a reutilização garante que resíduos que seriam descartados passem a ter um propósito com maior valor agregado e, ainda, não impacte negativamente o ambiente.

Para reutilização do EPS pós-consumo é preciso que os resíduos passem, primeiramente, pela etapa de limpeza, seguindo para a reciclagem. O processo de reciclagem pode ocorrer através de três formas: reciclagem energética, utilizando o material de acordo com seu poder calorífico; reciclagem química, produzindo gases e óleos; e a reciclagem mecânica, é a mais conhecida e utilizada para fabricação de novos produtos. Para que este tipo de reciclagem ocorra, o material deve ser recolhido, separado e limpo, para que não haja contaminação durante o processo. O material limpo segue uma série de etapas, sendo elas: trituração a partir de uma máquina compactadora; exposição ao calor para que haja aglutinação do material (aumento de densidade); extrusão do material em temperaturas controladas (fusão); produção de filetes; resfriamento, secagem e granulação para reinserir o material novamente no mercado do poliestireno (PLASTIVIDA, 2015; ISOMAF, 2022; CONSTRUMARKET, 2022).

A reciclagem de resíduos de EPS pós-consumo proporciona ganhos ambientais relevantes, como a economia de energia e matéria prima virgem durante a produção e até a promoção de um consumo mais consciente. A prática de reciclagem garante uma nova fonte de

renda para cooperativas e catadores, entretanto, existem alguns desafios que precisam ser abordados, entre eles a falta de leis que especificam as atividades de todas as partes interessadas, como também o desafio relacionado ao transporte, visto que o material possui um volume elevado com pouco peso, ou seja, possui uma densidade muito baixa, fazendo com que o transporte seja uma etapa muito custosa para o processo (CONSTRUMARKET, 2022).

Analizando a indústria de embalagens, observou-se um crescimento de R\$ 76,29 bilhões em 2019 para R\$ 110,90 bilhões em 2021, correspondendo aos plásticos a maior participação em valor, com 37,1% (ABRE, 2022). Entre os resíduos plásticos reciclados observou-se um aumento de 5,8% no ano de 2020 quando comparado ao ano anterior, com 1,4 milhões de toneladas. As embalagens e descartáveis de uso único representaram 68,5% desse valor, atingindo 960 mil toneladas de plásticos reciclados.

Mudando de um foco geral para mais específico, a produção de EPS e o Consumo Aparente Nacional (CAN) atingiram um grande volume em 2016, com 57,3 mil e 84,1 mil toneladas, respectivamente, e a participação de importação chegou a 36,6%. Já para 2021, a produção de EPS atingiu 119,6 mil toneladas enquanto o CAN atingiu 129,5 mil toneladas, dando um grande salto em 5 anos. Uma pesquisa mostrou em 2019 que de toda essa produção apenas 34,5 mil toneladas de EPS são recicladas anualmente e destinados a aplicações diferentes, fazendo do restante não reciclado, um problema para o meio ambiente (ABIQUIM, 2023; CONSTRUMARKET, 2022).

Desta forma, nota-se que o Brasil já atua na reciclagem do EPS, obtendo como resultados 30,7% e 30,9%, para os anos de 2019 e 2020, respectivamente, sendo o segundo material plástico pós-consumo mais reciclado, perdendo apenas para o PET – politereftalato de etileno, com 53,5% em 2020. Devido à grande conscientização e oportunidades encontradas nos resíduos, há uma tendência de crescimento de empresas recicladoras de materiais plásticos no Brasil, possuindo 1.119 empresas em 2020, estas que contribuíram com 13.180 empregos na indústria do plástico. Observando de forma mais ampla e não somente o material pós-consumo, a indústria de transformados plásticos contribuíram com 11.032 empresas, gerando 336,7 mil empregos para o setor (ABIPLAST, 2022).

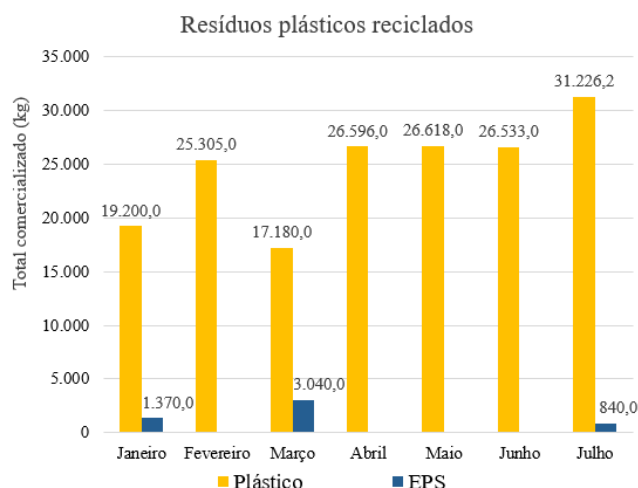
Ao analisar alguns tópicos que envolvem a indústria do EPS, é notório que há uma concentração do setor no estado de São Paulo, este que possuía 4,7 mil empresas de transformação em 2020 e em 2021 gerou mais de 144 mil empregos. Observando as empresas de reciclagem, o estado de São Paulo contempla a maior quantidade, passando de 319 em 2019 para 338 em 2021, valor que representa 30,2% do total de empresas do Brasil. O mesmo

acontece com os empregos gerados, ou seja, mais de 2,5 mil empregos foram gerados em 2020, passando para mais de 3,7 mil em 2021, representando 28,2% dos empregos gerados no Brasil para este segmento (ABIPLAST, 2022; SINDIPLAST, 2022).

É possível constatar que a indústria do EPS reciclado está cada vez maior e há muitas oportunidades a serem exploradas. Desta forma, como o objetivo deste trabalho foi verificar algumas propriedades de painéis de partículas de madeira produzidos com resíduos de EPS pós-consumo, torna-se preciso observar a viabilidade de produção dos painéis de acordo com a quantidade de material pós-consumo disponível, ou seja, a quantidade de resíduos de EPS coletados que podem contribuir para esta destinação final de maior valor agregado.

A cidade de Bauru – SP, por exemplo, possui ecopontos onde é realizada a destinação correta e coleta deste material e, de acordo com a empresa ASCAM (2021), a qual surgiu com o intuito de prestar serviço na gestão de resíduos sólidos urbanos, principalmente focada em resíduos recicláveis e de matéria prima que possa gerar renda para catadores e trabalhadores de cooperativas, foi realizado e disponibilizado dados sobre a gestão dos Ecopontos da cidade de Bauru, conforme contrato realizado com a Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMA), os quais fornecem dados sobre os meses de janeiro a julho de 2021. De acordo com o Gráfico 9, o qual contém dados sobre os plásticos reciclados nos ecopontos de Bauru – SP, nota-se que uma grande quantidade de plásticos são reciclados todos os meses, entretanto, o EPS representa apenas uma pequena parcela e ainda não é encontrado todos os meses. Os valores encontrados da reciclagem do EPS são apresentados em três meses, sendo eles expressos pela quantidade reciclada nos meses de março, com 3.040 kg de material, seguido pelos meses de janeiro (1.370 kg) e julho (840 kg).

Gráfico 9 – Resíduos plásticos reciclados na cidade de Bauru – SP.



Fonte: ASCAM (2021).

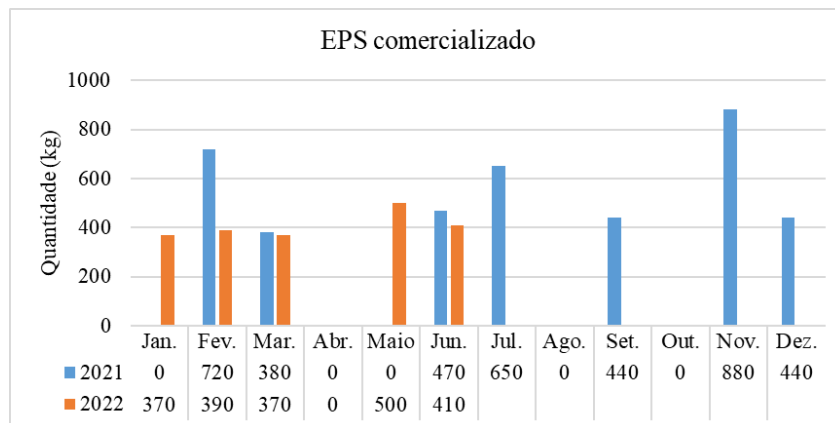
Por meio da análise da coleta de EPS pós-consumo na cidade de Bauru – SP, pode-se observar que no primeiro semestre de 2021 foram coletados 5.250 kg de resíduos de EPS (ASCAM, 2021). Conforme a pesquisa objeto de estudo do trabalho em questão, apresentada nos itens subsequentes, esta quantidade seria suficiente para produção de 88.983 painéis de 40 cm x 40 cm contendo 25,0% de EPS em sua composição, ou seja, seria possível produzir mais de 14 mil m² de painéis, caso a composição seja de 12,5%, o valor dobra, indo para mais de 28 mil m².

Outras cidades no interior do estado de São Paulo também realizam a coleta e reciclagem de EPS, como a Cooperativa Acácia de Catadores, Coleta, Triagem e Beneficiamento de Materiais Recicláveis de Araraquara e, de acordo com o relato de Joaquim (2022), há uma média de 1.000 kg de EPS processados por mês, demonstrando o uso contínuo deste tipo de material. O valor coletado é equivalente a produção de 32.542 m² de painéis com 25,0% de EPS por ano ou 65.084 m² de painéis com 12,5% de EPS, conforme proposto no trabalho em questão.

A cidade de Mogi Guaçu – SP também realiza a coleta seletiva de materiais como o EPS, eletrônicos, metais, óleo, papel e papelão, plásticos em geral e vidro, realizou a captação e triagem de 357.283 kg de materiais em 2022, em que o EPS representou aproximadamente apenas 1,0% de todo material. A parceria realizada entre a Associação 3R's com as instituições Mogi Open Data e Instituto Ambiente, resultou na criação da plataforma de transparência sobre a gestão de todos os tipos de resíduos presentes no município. Desta forma, foi possível

destacar a coleta de EPS, que pode ser observada no Gráfico 10, em que está expresso a quantidade de resíduos de EPS comercializado para os anos de 2021 e 2022, até o mês de junho.

Gráfico 10 – EPS comercializado em Mogi Guaçu



Fonte: ASSOCIAÇÃO COOPER 3R'S (2022).

De acordo com o Gráfico 10 e com relação ao ano de 2021, estima-se que 3.980 kg de resíduos de EPS foram comercializados, apresentando picos de comercialização no começo e no final do ano, com 720 kg em fevereiro e 880 kg em novembro. É notório que em alguns meses não houve comercialização deste tipo de material, tanto para o ano de 2021 como para o ano de 2022, onde não há dados sobre o mês de abril. Avaliando o ano de 2022, nota-se que o mês de maio atingiu o maior valor entre os meses, com 500 kg de resíduos de EPS, já os demais meses seguem uma média próxima a 400 kg/mês, aparentando uma diminuição em comparação ao ano anterior, totalizando 2.040 kg de material comercializado até junho de 2022. De acordo com a quantidade de material coletado pelo período de 2021 a junho de 2022, torna-se possível produzir 16.325 m² de painéis com 25,0% de EPS ou 32.650 m² de painéis com 12,5% de EPS.

Outros estados também atuam na reciclagem do EPS, exemplo disso é a empresa de Joinville, Termotécnica, a qual criou uma unidade em 2007 para trabalhar somente com EPS reciclado, se tornando uma referência nacional. Utilizando conceitos da economia circular e o apoio entre diversas empresas, a reciclagem do EPS está crescendo e colaborando para que novos projetos nasçam, como o Isopor Amigo, projeto que teve início em outubro de 2020 e com um pouco mais de um ano e meio de trabalho, já fez a reutilização do material aumentar de 25% para 80%. A coleta do material também apresenta um valor expressivo, atingindo 600 kg de EPS coletados em 16 meses, valor equivalente a 65 mil recipientes de marmitas e que pode contribuir com a produção de 1.627 m² de painéis com 25,0% de EPS ou 3.254 m² de painéis com 12,5% de EPS (O MUNICÍPIO JOINVILLE, 2022).

De acordo com esses dados, é notório que há material disponível no Brasil e principalmente no estado de São Paulo, viabilizando a produção de painéis de partículas de madeira com resíduos de EPS pós-consumo, necessitando apenas de um plano logístico para captação do material.

3.4.3 Trabalhos sobre aproveitamento de resíduos de EPS em compósitos.

Painéis de partículas de madeira com resina produzida a partir de resíduos de EPS, dissolvendo-o em gasolina, prensados a frio e acondicionados em estufa a 150 °C foram produzidos por Akineymi et al. (2019). As partículas de madeira apresentaram dois tamanhos, 0,85mm e 1,75mm, o EPS foi dosado de duas formas, com 1,5 e 2,0, caracterizando quatro tipos de amostras. Foram analisadas as propriedades físicas, inchamento em espessura (norma ASTM D 1037) e força de flexão (norma BS EN 310). Os resultados obtidos mostraram que houve uma diminuição da absorção de água e aumento da resistência a flexão conforme o aumento da dosagem de EPS, em razão do aumento da interação (força de ligação) entre as partículas. Os autores argumentaram que a combinação desses resíduos poderia ser utilizada para produtos destinados à construção civil, tanto para aplicações internas como externas.

Ohijeagbon, et al. (2020), fabricaram painéis compostos por serragem e polipropileno, utilizando como adesivo cimento com EPS. Durante a produção foram variadas as relações de quantidades entre serragem-polipropileno, bem como a relação entre cimento-EPS. Os autores observaram que o aumento de EPS resultou em uma diminuição da densidade do compósito, assim como sua absorção de água. Um fato evidenciado pelos autores foi que o cimento, por ser um material cerâmico e diferente dos demais, pode ter influenciado negativamente na resistência do material produzido. Entretanto, a literatura citada contribuiu com uma nova combinação para reutilização destes resíduos para produção de um compósito mais leve.

Luo et al. (2020) pesquisaram sobre painéis compostos por partículas de madeira e EPS adicionado no núcleo, utilizando como adesivo isocianato de polimetileno, resultando em painéis com densidade média de 400 kg/m³ (baixa densidade). Os autores investigaram a variação da quantidade de EPS do painel (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%) e temperatura de prensagem (110°C e 140°C) nas propriedades de resistência à flexão (MOR), módulo de elasticidade na flexão (MOE), ligação interna, espessura de inchamento, perfil de densidade e microestrutura de acordo com as normas GB/T 17657-2013 e GB/T 4897-2015. Os resultados

obtidos mostram que a inclusão de EPS melhorou as propriedades de MOR e MOE para qualquer quantidade de EPS adicionada, em que o menor resultado obtido foi pelo painel testemunha (somente madeira) de 1,8 MPa (MOR) e 517 MPa (MOE), enquanto o melhor resultado foi obtido pelo painel com maior quantidade de EPS, com 12,5% e com valores de 5,7 MPa (MOR) e 1059 MPa (MOE). Foi observado que a adição de EPS garantiu uma redução da absorção de água e melhoria da ligação interna. Variações significativas não foram observados conforme a quantidade de EPS do painel.

Lu et al. (2021) realizaram testes para verificar as propriedades de retardamento de chama baseado nas normas ASTM D2863-17, ASTM D3801 e ASTM E1354-17, verificaram a absorção sonora segundo a norma GB/Z 27764-2011, condutividade térmica de acordo com a norma GB/T 10295-2008 e propriedades mecânicas conforme as normas GB/T 1043-2008 e GB/T 17657-2013 para um painel de partículas de madeira e esferas de EPS envolvidos com um conteúdo retardador de chama. O conteúdo aglutinante e retardador de chama foi composto por polimetil acrílico com 52% de sólidos, grafite expansível (EG) e polifosfato de melamina (MPP). Durante a produção das amostras, o conteúdo de EG e MPP representavam 20% em peso do painel e suas quantidades foram sendo variadas entre si, assim como as quantidades de madeira e EPS. Como resultados, os autores observaram uma redução das propriedades mecânicas dos compósitos quando comparado ao painel contendo somente madeira, aumento da absorção sonora e uma redução da condutividade térmica com a inclusão do EPS. Ao comparar as variações do conteúdo retardador de chama notou-se que houve um aumento no tempo de ignição e diminuição no tempo de queima. Desta forma, os autores constataram resultados satisfatórios para o compósito, evidenciando uma possível aplicação como material de enchimento em construções.

Adnan e Hermawan (2022) produziram painéis de partículas de madeira de kelempayan utilizando resíduos de EPS como adesivo. Os autores produziram os painéis com diferentes porcentagens de EPS, sendo 10%, 20% e 40%. A etapa de prensagem foi realizada por 10 minutos, a 180 °C e com 30 toneladas. Foram avaliadas as propriedades físicas de teor de umidade, densidade e inchamento em espessura, assim como as propriedades mecânicas de módulo de ruptura, módulo de elasticidade e ligação interna. Os ensaios foram baseados na Norma Industrial Japonesa para Aglomerado JIS A 5908 Tipo 8. Os resultados obtidos mostraram que as maiores propriedades mecânicas foram obtidas pelo compósito com 40% em quantidade de resíduos de EPS, demonstrando a possibilidade da utilização de EPS como adesivo em painéis.

Prasittisopin et al. (2022) realizou uma revisão da literatura resumindo 253 artigos relacionados a tecnologia do concreto e a inclusão de EPS em materiais à base de cimento. O escopo do artigo abrange misturas de concreto e argamassa contendo esferas de EPS projetados com cimento Portland comum. Os autores observaram que o principal ponto para incorporar o EPS estava relacionado a diminuição do peso e para melhorar o desempenho térmico e acústico, fato que foi confirmado pelos autores. Notou-se que a resistência mecânica diminuiu com a adição do EPS devido a maior porosidade, entretanto, o desempenho dinâmico e a propriedade de fadiga foram melhoradas. Com relação ao desempenho a longo prazo, constatou-se que a inclusão de EPS melhorou características de corrosão, degelo, ataque químico e de sulfato e resistência ao fogo, em contrapartida, gerou impactos negativos na carbonatação e retrações. Os autores relataram que a adição de EPS é benéfico para a sustentabilidade, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa, porém ainda não se sabe como será realizada a disposição de estruturas envelhecidas de cimento e EPS.

Observa-se que, na grande maioria da literatura disponível, a utilização de EPS em painéis compósitos de madeira se dá pela aplicação deste insumo como adesivo. Na sua forma íntegra, o EPS é explorado em compósitos cimentícios e de cura à frio, sendo o emprego de temperatura na fabricação mantendo este material íntegro (sem fundir-se) um desafio tecnológico.

3.5 Propriedades térmicas dos materiais

É pertinente o entendimento das propriedades térmicas nos materiais para que possa compreender e analisar o comportamento de acordo com a aplicação e a variação da temperatura, pois há uma relação entre mudança de dimensões e alteração da temperatura na maioria dos materiais construtivos (MORAVIA, 2007). Desta forma, ao analisar o conceito de transferência de calor e de acordo com Çengel (2012), esta propriedade pode ser definida como uma energia em movimento decorrente de uma diferença de temperatura entre dois pontos. Com isso, o calor é uma manifestação transitória que ocorre do meio com maior temperatura para o meio com menor temperatura, até que o sistema entre em equilíbrio térmico e não haja mais variação entre as temperaturas.

Pode-se verificar a transferência de calor por meio de três modos básicos, sendo a condução, convecção e radiação. Para que possa ocorrer condução de calor, as partículas

precisam estar próximas para que haja a interação entre elas, consequentemente, a condução da partícula de maior energia para a com menor energia. A convecção, por sua vez, ocorre através da interação entre um fluido em movimento com um sólido, combinando o movimento do fluido com o efeito de condução de calor. Por fim e não menos importante, a radiação ocorre por meio de ondas eletromagnéticas emitidas por um meio, no qual altera as configurações das partículas de outro meio na forma de calor (INCROPERA, 2008; ÇENGEL, 2012).

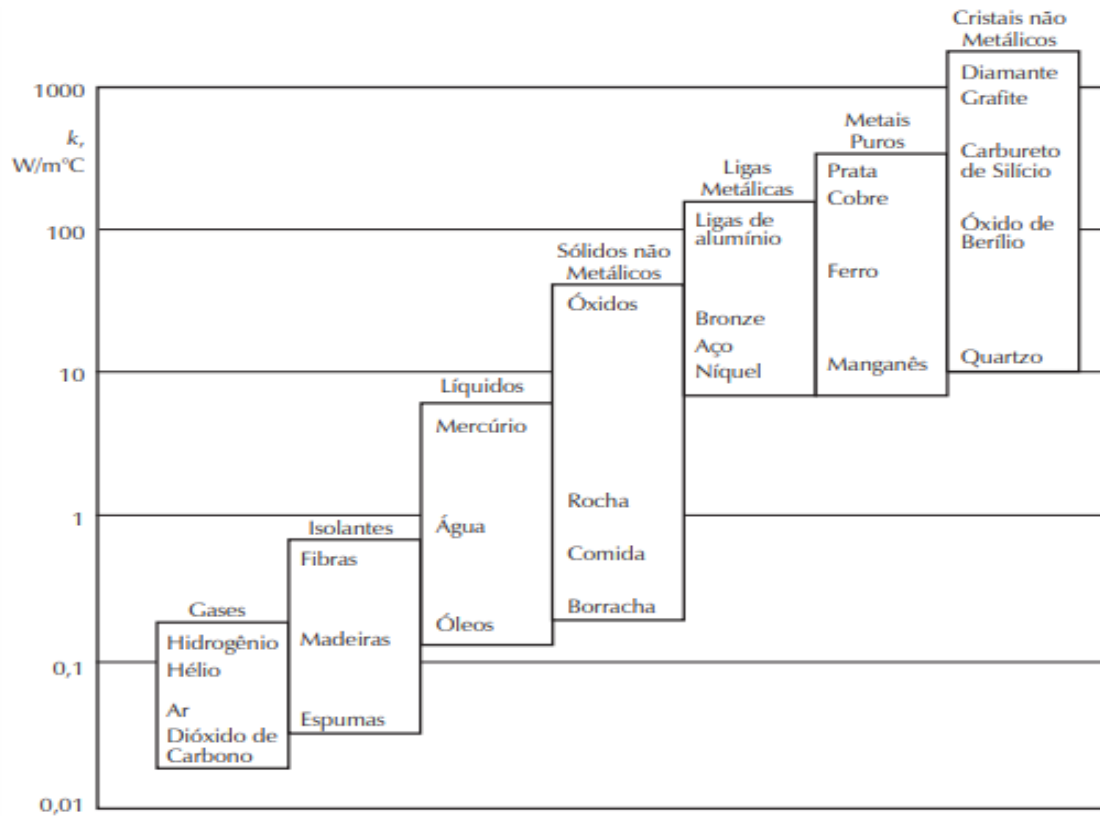
A condutividade térmica nos materiais está ligada com a propriedade de transferência de calor, uma vez que ela pode ser caracterizada como a capacidade que um certo material tem de transmitir calor, sob condições determinadas, por meio de uma espessura unitária e com um gradiente de temperatura. Em outras palavras, esta propriedade quantifica o quanto um material pode conduzir energia térmica. O valor encontrado para a condutividade térmica é intrínseco a cada material e depende da pureza e temperatura na qual ele se encontra. No âmbito coletivo, todos os materiais aumentam sua condução de calor com o aumento da temperatura (CALLISTER, 2003; INCROPERA, 2008; ÇENGEL, 2012).

Atualmente, a condutividade térmica está sendo muito estudada, pois ela é determinante para verificar possíveis aplicações para os materiais, dado que materiais com elevado valor para esta propriedade podem ser usados como bons condutores, o contrário também acontece, onde materiais com baixo valor são caracterizados como maus condutores, ou bons isolantes térmicos. Os materiais isolantes podem ser relacionados com a minimização do consumo energético no setor de construção civil, já que este ocupa um lugar de grande consumo, sabendo que há relação entre o consumo e os aspectos econômicos e ambientais. Desta forma, com os impactos negativos socioeconômicos e ao ambiente, faz-se necessário a colaboração do desenvolvimento tecnológico com o crescimento sustentável (ÇENGEL, 2012; ANGELIN, 2018).

No livro publicado por Çengel (2009) é verificado uma faixa da condutividade térmica de alguns materiais aplicados a temperatura ambiente (Figura 5) e, é possível constatar que materiais metálicos puros possuem um valor elevado para condutividade térmica, o contrário é observado para os materiais isolantes como as fibras, madeiras e espumas, os quais apresentam um valor entre 0,01 e 1 W/m°C. Desta forma, é plausível dizer que os metais puros, por exemplo, não seriam ideias para aplicações com a intenção de melhorar o isolamento térmico, em contrapartida, as madeiras e espumas, sim. Corroborando com esta argumentação, Lucas (2021) diz que a utilização de materiais com baixa condutividade térmica em parede e

tetos, colabora para redução do consumo de energia em edifícios, colaborando com o crescimento mais sustentável.

Figura 5 - Faixa de condutividade térmica dos materiais aplicados em temperatura ambiente



Fonte: Çengel (2009)

A norma ABNT NBR 15220 (2003) discorre sobre o desempenho térmico em edificações e nela é estabelecido algumas definições, símbolos e unidades associados as características térmicas de diversos materiais que podem ser observados na Tabela 1. A Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de alguns materiais como argamassas, cerâmicas, isolantes térmicos (entre eles o poliestireno expandido), madeiras e derivados e metais estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais

Material	ρ (kg/m³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
Argamassas			
argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,70	0,84
argamassa celular	600-1000	0,40	1,00
Cerâmicas			
Tijolos e telhas de barro	1000-1300	0,70	0,92
	1300-1600	0,90	0,92
	1600-1800	1,00	0,92
	1800-2000	1,05	0,92
Isolantes térmicos			
lã de rocha	20-200	0,045	0,75
lã de vidro	10-100	0,045	0,70
poliestireno expandido moldado	15-35	0,040	1,42
poliestireno extrudado	25-40	0,035	1,42
espuma rígida de poliuretano	30-40	0,030	1,67
Madeiras e derivados			
carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus	600-750	0,23	1,34
	450-600	0,15	1,34
	300-450	0,12	1,34
aglomerado de fibras de madeira (denso)	850-1000	0,20	2,30
aglomerado de fibras de madeira (leve)	200-250	0,058	2,30
aglomerado de partículas de madeira	650-750	0,17	2,30
	550-650	0,14	2,30
placas prensadas	450-550	0,12	2,30
	350-450	0,10	2,30
Metais			
aço, ferro fundido	7800	55	0,46
alumínio	2700	230	0,88
cobre	8900	380	0,38
zinco	7100	112	0,38

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220 (2003)

Corroborando com informações sobre as propriedades térmicas dos materiais, o livro elaborado por Callister e Rethwisch (2011) aborda tópicos importantes sobre o tema e fornece alguns dados sobre a condutividade térmica dos materiais. De acordo com o conteúdo, é possível verificar um padrão de propriedades conforme o tipo de material, no caso de materiais metálicos, a condutividade térmica (W/m.K) apresenta valores mais elevados, como exemplo de metais tem-se o ouro e o alumínio, em que sua condutividade térmica é de 315 e 247 W/m.K, respectivamente e, o mecanismo de transferência de calor se dá por meio das vibrações atômicas e movimento de elétrons livres. Seguindo para o próximo tipo de material, tem-se os materiais cerâmicos, estes que possuem uma condutividade térmica intermediária e a transferência de

energia acontece por meio de vibrações atômicas. Como exemplo de materiais cerâmicos estão a magnésia (MgO) e a alumina (Al_2O_3), possuindo uma condutividade térmica de 38 e 39 W/m.K, respectivamente.

O terceiro tipo de material estudado por Callister e Rethwisch (2011) são os polímeros, material cuja transferência de energia acontece por meio da vibração e/ou rotação das moléculas das cadeias poliméricas. Como exemplo desses materiais encontram-se o teflon e o poliestireno, apresentando valores para a condutividade térmica de 0.25 e 0.13 W/m.K, respectivamente. Pelo fato do poliestireno estar entre os materiais com baixa condutividade térmica, caracterizando-o como um excelente isolante térmico, pode-se evidenciar seus usos para a finalidade de isolar o calor, tanto o calor que pode entrar (externo) como o que pode sair (interno) de algum ambiente.

Outra característica relevante a ser analisada está atrelada a capacidade do material manter suas propriedades, ou características, de acordo com a temperatura e isso está relacionado com a estabilidade térmica dos materiais. Alguns autores estudam sobre esta propriedade em compósitos, como Cheng et al. (2023), que propôs uma nova estratégia de reticulação múltipla para preparação do adesivo a base de glúten do trigo, um produto adaptável na preparação de materiais devido a sua biodegradabilidade, alto teor de proteína, com boa viscoelasticidade, ductilidade e propriedades de formação de filme. Para suas análises, Cheng et al. (2023) preparou algumas amostras de adesivo variando as quantidades de glúten de trigo, taninos condensados, polímero de etileno imina e éter triglicídico de glicerol. Os autores analisaram algumas propriedades, entre elas o desempenho termodinâmico e estabilidade térmica das proteínas. Como resultados, foram observados perda de água e de materiais voláteis na faixa de temperatura de 40 a 150 °C e, à medida que a temperatura subia, na faixa de 150 a 500°C, houve rápida perda de massa devido a degradação da proteína. Desta forma, os autores concluíram que houve boa sinergia entre os materiais utilizando, garantindo melhora nas propriedades analisadas.

Bollakayala et al. (2023), analisaram compósitos de serragem de madeira, EPS reciclado e fuligem veicular reciclada como aditivo à base de carbono. O EPS foi dissolvido e utilizado como adesivo para a formação de painéis com carga de fuligem adicionada variando de 0 a 2,5% em peso. A estabilidade térmica dos painéis foi analisada e como resultados foram observados que na faixa de 100 a 240°C houve perda de massa de evaporação de água e componentes voláteis, a partir desta temperatura (240°C) houve a degradação térmica e perda significativa de massa decorrente da queima das moléculas da madeira. Como conclusão geral,

os autores apontam essa composição como de um compósito com potencial para produção de baixo custo e a fuligem reciclada com substituto para material comercial de carbono.

3.6 Considerações com base na Revisão de Literatura

Com base no exposto na revisão bibliográfica, justifica-se a realização deste trabalho. O reaproveitamento de resíduos, como o EPS pós-consumo, aliado as partículas de madeira e ao adesivo parcialmente derivado de biomassa, contribuem para a obtenção de produtos com impacto ambiental reduzido, os quais podem ser potenciais para utilização em aplicações na construção civil, como isolamento térmico em edificações. A utilização de partículas de madeira industriais pode ser uma possibilidade para a obtenção de novos produtos neste segmento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O tópico de materiais e métodos contém a forma pela qual este trabalho foi elaborado, com as diferentes etapas, com relação a produção dos painéis de partículas, como também a descrição dos ensaios realizados para obtenção das propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos painéis.

4.1 Etapas deste trabalho

Este estudo foi elaborado em três etapas, sendo elas:

- 1º Etapa: avaliação da melhor configuração dos painéis de partículas com relação a quantidade de EPS adicionado, verificando as propriedades físicas e mecânicas;
- 2º Etapa: determinação da condutividade térmica das amostras produzidas;
- 3º Etapa: caracterização das partículas do material utilizado na produção dos painéis, seguida pela análise de microscopia eletrônica de varredura das 3 composições de painéis produzidos e análise termogravimétrica do EPS e dos painéis testemunha e com 25% de EPS.

As amostras produzidas nas três etapas e as variáveis analisadas então descritas na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Etapas e variáveis das amostras estudadas neste trabalho.

Etapa	Amostra	Variáveis
1ª etapa: propriedades físicas e mecânicas	1- Testemunha (sem adição de EPS)	-
	2- EPS no núcleo +1/3 de madeira do painel	12,5% de EPS
	3- EPS no núcleo +1/3 de madeira do painel	25,0% de EPS
2ª etapa: condutividade térmica	1-Testemunha (sem adição de EPS)	-
	2-EPS no núcleo +1/3 de madeira do painel	12,5% de EPS
	3- EPS no núcleo +1/3 de madeira do painel	25,0% de EPS
3ª etapa: caracterização complementar.	1-Granulometria: Partículas de madeira e EPS	-
	2- TG e DSC: Todos os tratamentos	0%, 12,5% e 25% de EPS
	3- Microscopia eletrônica de varredura: Todos os tratamentos	0%, 12,5% e 25% de EPS

Fonte: Próprio autor (2024)

As duas quantidades de EPS foram selecionadas (12,5% e 25%) com base em estudos realizados anteriormente pelo próprio autor, sendo eles: Pizza et al. (2022a), em que foi analisada as propriedades físicas e mecânicas para a quantidade de 20% de EPS no núcleo e disperso no painel; Pizza et al. (2022b), em que foi analisado a condutividade térmica para painéis com 20% de EPS; Rodolpho et al. (2022), em que foram avaliadas duas quantidades de EPS, 15% e 30%, na forma dispersa e no núcleo do painel; e ainda houveram outros como Pizza (2020); Pizza et al. (2019) e Kitai et al. (2019). É importante destacar que as quantidades escolhidas para este estudo foram pensadas visando as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e de produção dos painéis, visto que o EPS é um produto com baixa densidade, ocupando muito volume para poucas quantidades de material.

4.2 Produção dos painéis de partículas

Para produção dos painéis, foram utilizadas partículas de madeira de eucalipto doadas pela empresa Eucatex, localizada em Botucatu – SP, a qual disponibilizou as partículas em duas dimensões utilizadas no processo do produto MDP na empresa, sendo partículas finas, utilizadas na superfície do painel, e partículas grossas, utilizadas para o núcleo do painel. A granulometria das partículas são mencionadas no item 4.3.

As partículas de poliestireno expandido utilizadas no núcleo dos painéis foram obtidas de profissionais da coleta de EPS pós-consumo proveniente de embalagens térmicas, os quais fazem seu processamento em partículas, comercializando para empresas diversas. Apesar de adquirir-se o EPS pós-consumo já nesta condição para o trabalho em questão, pode-se propor a coleta e gerenciamento destes resíduos aos centros de reciclagem ou empresas que utilizam o EPS para a finalidade de obtenção dos painéis, um produto de maior valor agregado para a destinação deste material. A quantidade de EPS utilizada nos painéis foi de 12,5% e 25,0% (1ª e 2ª etapas) e 12,5% (3ª etapa) em relação ao volume total do material do painel, considerando a densidade do EPS de $0,10 \text{ g/cm}^3$ (ABNT NBR 11949, 2007) e densidade nominal dos painéis de $0,55 \text{ g/cm}^3$.

A Figura 6 contém as partículas utilizadas para a produção dos painéis, sendo dois tipos de partículas de eucalipto e o resíduo de EPS.

Figura 6 – Partículas finas e grossas de eucalipto e partículas de EPS



Fonte: Próprio autor (2024)

O adesivo utilizado para a fabricação dos painéis foi a resina poliuretana bicomponente a base de óleo de mamona, fabricante Imperveg, composta por poliuretano vegetal (óleo de mamona) e isocianato, na qual foi utilizada na proporção pré-polímero: polioliol de 1:1. Dias (2005) e Gava et al. (2015) mencionam que este adesivo a base de óleo de mamona apresenta a vantagem de possuir sua matéria prima parcialmente renovável e natural, sua tecnologia é de origem nacional, não é agressiva ao meio ambiente e garante a característica de impermeabilidade aos painéis, visto que este tipo de resina apresenta menor afinidade com a água do que o adesivo de ureia formaldeído tradicional. Reafirmando os benefícios deste adesivo, Fiorelli et al. (2012) realizaram microscopia eletrônica de varredura (MEV) e observaram que a resina ocupa as lacunas presentes entre as partículas, propiciando uma melhora das propriedades mecânicas e físicas dos painéis de partículas. Além disso, este tipo de resina cura a frio, ou seja, em temperaturas inferiores a 100°C (DIAS, 2008) e menores que a temperatura de fusão do EPS (100°C; CALLISTER, 2003), contribuindo para que o EPS se mantenha em estado sólido na composição do painel. A Figura 7 contém a resina utilizada e seus componentes, um mais escuro e denso (isocianato) e, outro mais claro e menos denso (polioliol).

Figura 7 – Resina bicomponente poliuretana a base de óleo de mamona

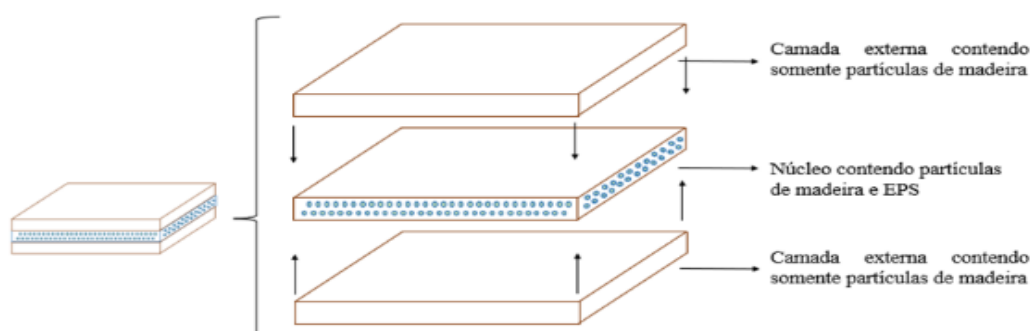


Fonte: Próprio autor (2023)

Para a produção dos painéis de partículas, primeiramente fez-se necessária realizar a pesagem das quantidades de madeira, resina e EPS para cada painel de acordo com cada tratamento. A quantidade de material foi calculada com base na densidade nominal dos painéis de $0,55 \text{ g/cm}^3$, obtendo-se a quantidade em madeira e conforme as camadas externas e interna. Após a determinação da quantidade de madeira, foram determinadas a quantidade de resina e a quantidade de EPS. A resina foi misturada nas partículas de madeira de forma manual e as partículas de EPS foram adicionadas e misturadas nas partículas de madeira de maior granulometria, ou seja, compuseram somente o núcleo dos painéis.

A mistura de madeira + adesivo + EPS foi inserida em um molde de dimensões de 42 cm x 42 cm seguindo o padrão de camadas observado na Figura 8. Na sequência, foi realizada a pré-prensagem da mistura em uma prensa hidráulica, utilizando-se a carga de 5 toneladas por 5 minutos. Esta etapa de pré-prensagem para formação do colchão de partículas pode ser observada na Figura 9.

Figura 8 – Modo de produção e acondicionamento das partículas de madeira e EPS.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 9 – Formação do colchão de partículas e colchões com 0% EPS, 12,5% EPS e 25% EPS, respectivamente.



Fonte: Próprio autor (2024).

Em seguida, o molde foi retirado e um limitador metálico determinou a espessura dos painéis, de 13 mm. Para a etapa de prensagem a quente foi utilizada uma prensa hidráulica Hidral-Mac modelo PHH, capacidade de 80 toneladas. As especificações de prensagem foram pressão de 4 MPa, temperatura de 100 °C e tempo de prensagem de 12 minutos. Durante o período de prensagem foi realizada uma abertura da prensa no meio do período, para restabelecer a pressão. A Figura 10 contém o painel logo após a etapa de prensagem a quente.

Figura 10 – Pannel de partículas após a prensagem a quente.



Fonte: Próprio autor (2024).

Após a prensagem dos painéis, estes foram armazenados por 72 horas, com o intuito de haver a cura completa e equilíbrio da temperatura e umidade. Ao término deste período, os painéis foram esquadrejados nas dimensões de 40 cm x 40 cm, conforme Figura 11, para realização dos ensaios físicos, mecânicos e térmicos.

Figura 11 – Painéis de partículas esquadrejados.



Fonte: Próprio autor (2024).

4.3 Caracterização dos painéis e das partículas de madeira e poliestireno expandido

4.3.1 Análise granulométrica

A classificação das partículas de acordo com a distribuição granulométrica foi realizada com o equipamento apresentado na Figura 12, denominado agitador eletromecânico de peneiras, no Laboratório de Fenômenos de Transporte, Energia e Controle Ambiental, do Instituto de Ciências e Engenharia ICE/Unesp - Campus de Itapeva. As peneiras utilizadas para a análise possuíam abertura em *mesh* de 5, 10, 20, 32 e 60 e o ensaio foi conduzido com base nas normas NBR NM-ISSO 3310-1 (1997) e NBR 7402 (1982), avaliando os dois tipos de partículas industriais de madeira e EPS empregadas para produção de painéis.

Figura 12 – Agitador eletromecânico de peneiras



Fonte: Próprio autor (2024).

As condições do ensaio foram tempo de vibração de 10 minutos, frequência de vibração de 5 Hz, massa da amostra de madeira de 50 gramas e 5 gramas para massa de EPS devido a sua baixa densidade e, por fim, o ensaio foi realizado em triplicata para cada tipo de partícula. Após o ensaio, foram pesadas as massas de partículas retidas em cada peneira, para determinação da classificação granulométrica.

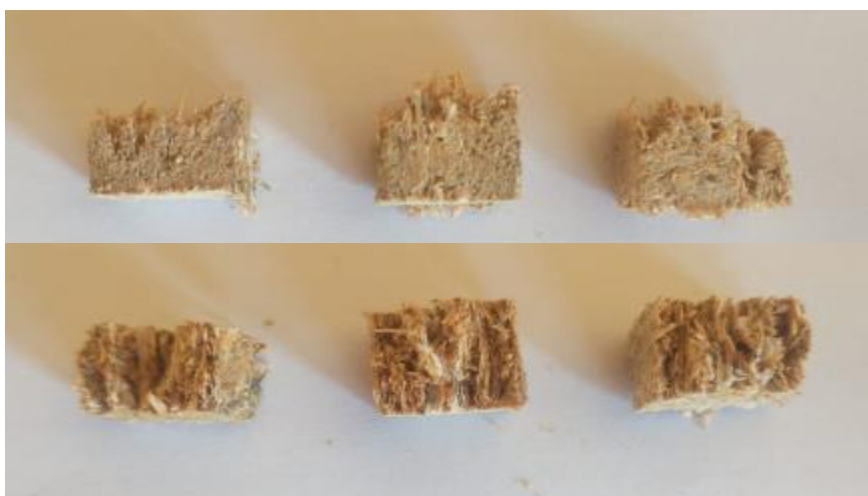
4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – painéis de partículas

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consiste em uma análise morfológica dos 3 tipos de painéis produzidos (testemunha – 100% madeira, 12,5% EPS e 25% EPS). O objetivo principal desta análise foi verificar a interação entre as partículas de madeira, EPS e a resina, assim como a distribuição entre as fases, os vazios internos e o comportamento dos materiais, pois as propriedades obtidas para os painéis estão particularmente ligadas a estas características microestruturais.

Uma análise bastante pertinente a ser feita é a respeito do EPS, visto que a temperatura de prensagem dos painéis é semelhante a temperatura de transição vítrea do polímero (100°C), sendo necessário verificar se o EPS atuou como isolante térmico (esferas fechadas com ar interno) ou como uma resina (material fundido), influenciando as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos painéis (CALLISTER, 2003).

Para o ensaio de MEV, foram preparadas 3 amostras, sendo uma de cada painel da região onde houve a ruptura do corpo de prova. Cada amostra era composta pelas três camadas do painel, sendo as duas camadas superficiais (partículas menores) e a camada interna (partículas maiores) contendo o EPS disperso. A Figura 13 contém as 3 amostras utilizadas vistas laterais (plano de corte) e superiores (plano de ruptura – análise MEV), na sequência apresentadas as amostras T1 – 100% madeira, T2 – 12,5% EPS e T3 – 25% EPS.

Figura 13 - Amostras de painéis T1, T2 e T3 para o ensaio MEV



Fonte: Próprio autor (2024).

As amostras possuíam a espessura dos painéis de 1,3 cm e demais dimensões de aproximadamente 1,0 x 1,0 cm. Foi preciso realizar a metalização das amostras com ouro (de 5 a 6 nm de espessura) pelo equipamento metalizador *Coating System* BAL-TEC MED 020 e as fotomicrografias de MEV foram capturadas pelo equipamento LEO 440 com detector OXFORD, com feixe de elétrons de 20kV (Figura 14). O ensaio foi realizado no Instituto de Química de São Carlos (IQSC), na Universidade de São Paulo.

Figura 14 - Equipamento Leo 440 para ensaio de MEV



Fonte: Próprio autor (2024).

4.3.3 Análises termogravimétricas (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC)

Para realização do ensaio de TG e DSC, o material a ser analisado foi processado em um moinho martelo modelo MAO48 da marca Marconi no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM), na EESC/USP - Universidade de São Paulo, para redução do tamanho das partículas, o qual pode ser observado na Figura 15. As três amostras analisadas foram a partir do painel contendo somente madeira (tratamento 1), do painel com 25% de isopor (tratamento 3) e do EPS puro. O material antes e após moagem, pode ser observado na Figura 16, assim como o EPS analisado o qual não necessitou de processamento no moinho para realização do ensaio.

Figura 15 - Moinho martelo



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 16–Material utilizado para ensaio de TG e DSC



Fonte: Próprio autor (2024).

Com as amostras devidamente preparadas, as análises termogravimétricas foram realizadas utilizando-se o analisador termogravimétrico da marca Mettler modelo TGA/DSC2 (Figura 17). Para realização das análises foram utilizadas 13,534 mg de painel de madeira,

10,339 mg de painel de madeira + EPS e, 2,846 mg de EPS puro. O material foi depositado em cadinho de alumina de 70 uL e as medições foram registradas em atmosfera de Ar sintético, com fluxo constante de nitrogênio de 100 mL/min, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min e uma faixa de temperatura iniciando em 30 °C e finalizando em 1000 °C.

Figura 17 - Analisador termogravimétrico TGA/DSC2 e porta-amostra.



Fonte: Próprio autor (2024).

4.3.4 Propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Para realização dos ensaios físicos e mecânicos foi realizado um plano de corte dos corpos-de-prova, buscando um melhor aproveitamento dos painéis e remoção das extremidades por ser uma região menos compactada. A Tabela 3 contém as dimensões dos corpos de prova, assim como a quantidade obtida de cada painel e o total por tratamento.

Os painéis foram caracterizados conforme a norma brasileira ABNT NBR 14810 (2018), a qual detalha as metodologias dos ensaios. Foram avaliadas as propriedades físicas de densidade, teor de umidade, absorção de água, para 2 e 24 horas e, inchamento em espessura, para 2 e 24 horas. As propriedades mecânicas avaliadas foram de resistência à flexão estática (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), adesão interna e resistência ao arrancamento de parafuso, na superfície e no topo. Todos os ensaios realizados estão descritos nos tópicos a seguir.

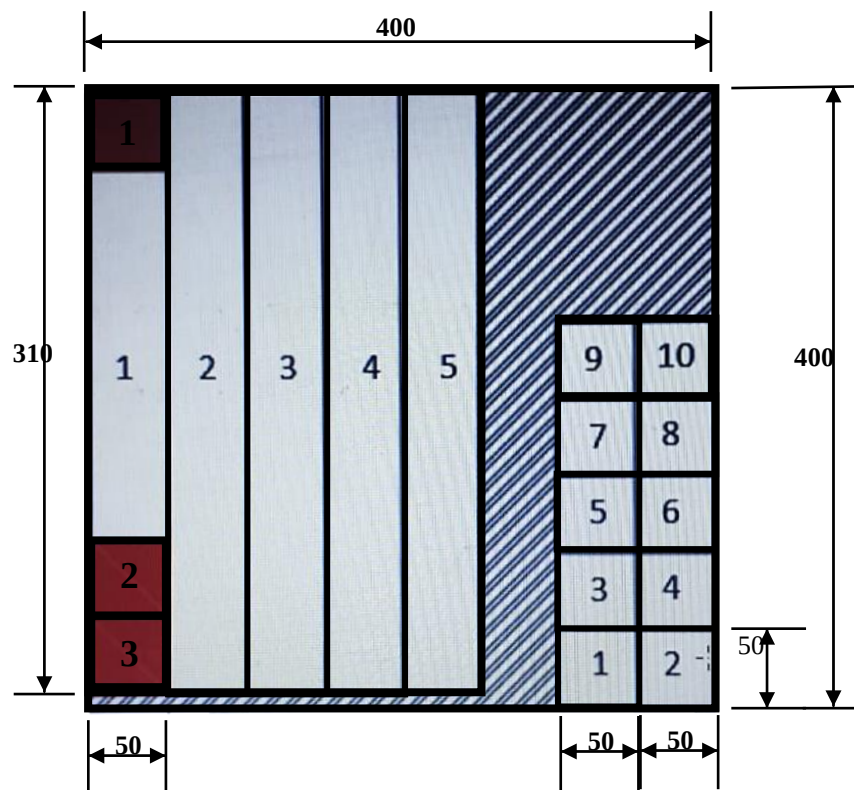
Tabela 3 - Corpos de prova: dimensões e quantidades

Propriedades NBR 14810 (2018)	Dimensões dos corpos de prova (mm x mm)	Quantidade de corpos de prova/painel	Total de corpos de prova/tratamento
Densidade	50 x 50	5	10
Teor de umidade	50 x 50	5	10
Inchamento em espessura – 2 horas	50 x 50	5	10
Inchamento em espessura – 24 horas	50 x 50	5	10
Absorção de água – 2 horas	50 x 50	5	10
Absorção de água – 24 horas	50 x 50	5	10
Resistência à flexão estática e módulo de elasticidade (MOE)	310* x 50	5	10
Adesão interna (resistência a tração perpendicular)	50 x 50	5	10
Resistência ao arrancamento de parafuso (superfície)	50 x 50	5	10
Resistência ao arrancamento de parafuso (topo)	50 x 50	5	10

*Comprimento do corpo de prova segundo NBR 14810:2 (2018) = 20 x espessura + 50mm. Fonte: Próprio autor (2024)

Conforme o plano de corte dos corpos de prova (CPs) (Figura 18), para cada painel foram retirados 5 corpos de prova de 310 x 50 mm para o ensaio de flexão estática. Os CPs em vermelho foram retirados após a ruptura dos CPs de flexão estática, com dimensões de 50 x 50 mm e para 4 ensaios diferentes: CP1 – Adesão interna; CP2 – Resistência ao arrancamento de parafuso (superfície e topo); CP3 – Teor de umidade e densidade. Os CPs de 1 a 10 com dimensões de 50 x 50 mm, canto inferior direito da Figura 18, foram utilizados para o ensaio de inchamento em espessura e absorção de água. Desta forma, para cada painel foi possível retirar 5 CPs para análise de cada propriedade física/mecânica, produzindo-se 2 painéis de cada tratamento. Para os demais ensaios (condutividade térmica, TGA/DSC e MEV) foi produzido mais um painel de cada tratamento, as especificações foram abordadas no tópico 4.5.

Figura 18 - Plano de corte dos corpos de prova.



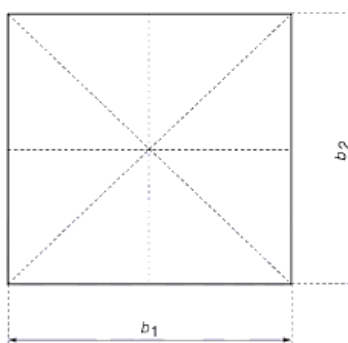
Fonte: Próprio autor (2024)

Foi realizado tratamento estatístico após a obtenção dos resultados para as propriedades físicas e mecânicas, por meio de análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey com o software Minitab 18®.

4.3.4.1 Densidade (D)

Para o cálculo da densidade, foi utilizado paquímetro de resolução 0,01 mm e balança de resolução de 0,01 g, e corpos de prova com dimensão de 50 mm x 50 mm, de acordo com a Figura 19, a qual contém as especificações da norma NBR 14810 (2018).

Figura 19 – Dimensões do corpo de prova de acordo com a ABNT



Fonte: NBR 14810 (2018).

O cálculo da densidade foi realizado utilizando as Equações 1 e 2, a seguir:

$$D = \frac{M}{V} \div 0,001 \quad (1)$$

$$V = b_1 \times b_2 \times e \quad (2)$$

Onde D representa a densidade do corpo de prova em g/cm^3 que se quer obter, M corresponde a massa em unidade de gramas, V o volume do corpo de prova em cm^3 , b_1 e b_2 são as dimensões do corpo de prova em cm, representados na Figura 19, e e corresponde a espessura em cm.

4.3.4.2 Teor de umidade (TU)

Para avaliação do teor de umidade, foram preparados corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm, os quais foram pesados em balança, com resolução de 0,01 g e, posteriormente, foram acondicionados na estufa para o processo de secagem com temperatura de 103 ± 2 °C, até que fosse atingida a massa constante. É considerada massa constante quando as amostras passam por um intervalo mínimo de 6 horas e as pesagens subsequentes não variam mais que 0,1%. A Figura 20 representa a estufa utilizada e os corpos de prova, evidenciando a forma na qual eles foram arranjados para realização do ensaio.

Figura 20 – Estufa e forma de acomodação de corpos de prova para o ensaio.



Fonte: Próprio autor (2024).

O cálculo do teor de umidade foi realizado utilizando a Equação 3, a seguir:

$$U = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (3)$$

Nesta equação, U representa o teor de umidade em porcentagem (%), MU está relacionado a massa úmida e MS a massa seca dos corpos de prova, em que ambas são expressas em gramas (g).

4.3.4.3 Inchamento em espessura (IE)

O ensaio de inchamento em espessura utilizou corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm, avaliando os períodos de 2 e 24 horas. Este ensaio consistiu em medir a espessura inicial dos corpos de prova secos, com paquímetro de resolução 0,01 mm e, logo após, imergi-los em um recipiente com água de forma que todos os corpos de prova ficassem submersos por completo. Passado o período de 2 horas de submersão das amostras, as amostras foram secas com papel absorvente e foi realizada a nova medida da espessura. Novamente os corpos de prova foram inseridos no recipiente com água e, no outro dia, após um período de 22 horas, totalizando as 24 horas necessárias, o mesmo procedimento foi realizado para medição

da nova espessura. O ensaio de inchamento em espessura foi realizado, portanto, para os dois períodos, 2 e 24 horas, e a Equação 4 demonstra o cálculo utilizado para esta propriedade.

$$I = \frac{E_i - E_0}{E_0} \times 100 \quad (4)$$

Em que I corresponde ao inchamento em espessura observado e expresso em porcentagem (%), E_i representa a espessura final e E_0 a espessura inicial do corpo de prova, ambas expressas em milímetros.

4.3.4.4 Absorção de água (AA)

A metodologia para o ensaio de absorção de água foi semelhante ao ensaio de inchamento em espessura, porém, avaliando-se a massa dos corpos de prova, para identificação da quantidade de água absorvida para os períodos de 2 e 24 horas.

Os corpos de prova possuíam dimensões de 50 mm x 50 mm e foram pesados em balança com precisão mínima de 0,01g antes que fossem imersos em água. Após a medição de suas massas iniciais, os corpos de prova ficaram submersos durante 2 e 24 horas. A quantidade de água absorvida foi calculada com base na Equação 5.

$$A = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \quad (5)$$

Onde A corresponde ao total de água absorvida expressa em porcentagem (%), M_i representa a massa final e M_0 a massa inicial do corpo de prova, ambas estão expressas em gramas (g).

4.3.4.5 Resistência à flexão estática (MOR) e módulo de elasticidade (MOE)

Para realização do ensaio de flexão estática e módulo de elasticidade foram produzidos corpos de prova retangulares com dimensões de (20 vezes a espessura + 50) mm x 50 mm, onde a espessura corresponde a 13 mm, desta forma, as dimensões foram 310 mm x 50 mm. Foi preciso determinar a área solicitada e, para isso, foi medida a espessura e largura dos corpos de prova com paquímetro com resolução de 0,01 mm. O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios EMIC modelo DL-30000, com capacidade de 300 kN. Após posicionamento dos corpos de prova, o ensaio aconteceu com velocidade constante, de modo que o corpo de prova se rompesse em um intervalo de tempo de (60 ± 30) segundos.

À resistência à flexão estática foi realizada com base na Equação 6.

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2} \quad (6)$$

Em que MOR corresponde ao módulo de resistência à flexão estática (N/mm^2), P a carga de ruptura indicada na máquina universal de ensaios EMIC (N), D a distância entre os apoios do aparelho, B é a largura do corpo de prova e E é a espessura do corpo de prova. As variáveis D , B e E estão expressos em milímetros.

O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a Equação 7.

$$MOE = \frac{P1 \times D^2}{d \times 4 \times B \times E^3} \quad (7)$$

Em que MOE representa o módulo de elasticidade expresso em N/mm^2 , $P1$ é a carga de ruptura indicada na máquina universal de ensaios EMIC (N), D a distância entre os apoios do aparelho, d a deflexão que corresponde a carga $P1$, B a largura do corpo de prova e E é a espessura do corpo de prova. As variáveis D , d , B e E estão expressos em milímetros. O ensaio de resistência a flexão e módulo de elasticidade, assim como os corpos de prova, podem ser observados na Figura 21.

Figura 21 – Ensaio de resistência à flexão e módulo de elasticidade e corpos de prova.



Fonte: Próprio autor (2024).

4.3.4.6 Resistência a tração perpendicular (RTP)

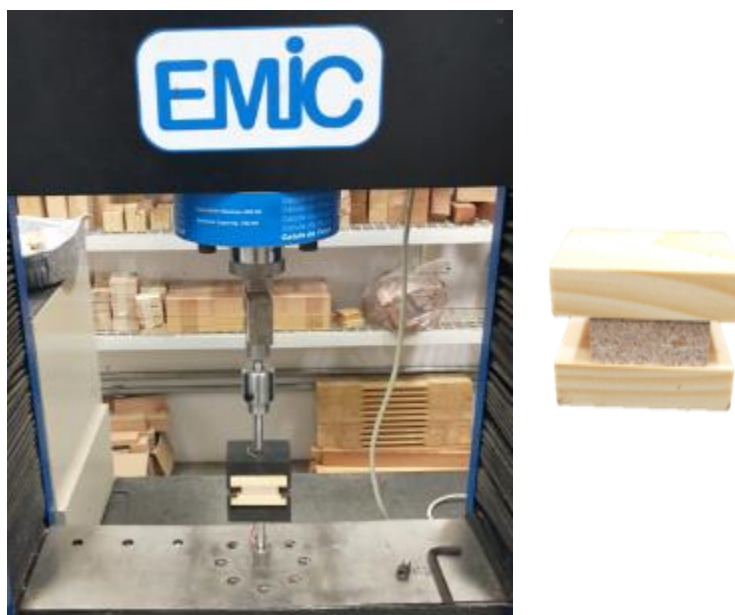
O ensaio de resistência a tração perpendicular às faces, ou adesão interna, foi realizado com corpos de prova de 50 mm x 50 mm, onde estes foram colados em blocos de tração pela superfície com adesivo instantâneo de cianoacrilato. Após o período mínimo de cura do adesivo (24 horas), o ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios EMIC.

A resistência a tração interna foi calculada por meio da Equação 8.

$$RTP = \frac{P}{S} \quad (8)$$

Em que *RTP* representa a resistência a tração perpendicular expressa em N/mm² (MPa), *P* corresponde a carga de ruptura em newtons (N) e *S* corresponde a área superficial do corpo de prova em mm². A Figura 22 representa o ensaio de resistência a tração perpendicular e o corpo de prova.

Figura 22 – Ensaio de resistência à tração perpendicular e corpo de prova.



Fonte: Próprio autor (2024).

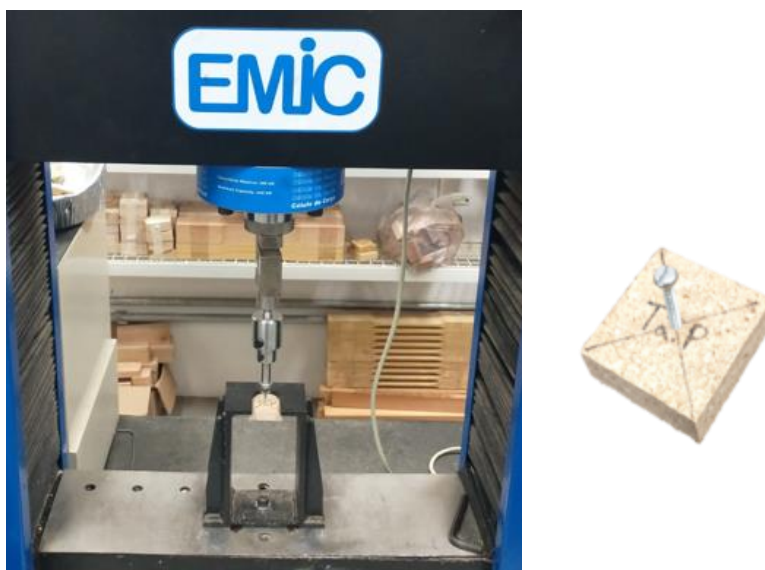
4.3.4.7 Resistência ao arrancamento de parafusos (AR)

O ensaio de resistência ao arrancamento de parafusos foi realizado tanto da superfície como no topo dos corpos de prova, estes que possuíam dimensões de 50 mm x 50 mm.

Para a realização do ensaio, fez-se um furo com broca de $(2,7 \pm 0,1)$ mm de diâmetro nos centros dos corpos de prova, tanto na superfície quanto no topo, para que fosse introduzido um parafuso, este com suas dimensões especificadas em norma. Foram utilizados os mesmos corpos de prova para os dois ensaios, sendo que o primeiro ensaio realizado foi o arrancamento de parafuso na superfície, sendo necessário preparar os corpos de prova novamente para o arrancamento de parafuso no topo. As amostras foram ensaiadas na máquina EMIC.

Os resultados foram expressos em newtons (N), correspondentes a força realizada pela máquina para arrancar o parafuso do corpo de prova. As Figura 23e Figura 24 representa os corpos de prova e os ensaios de arrancamento de parafuso na superfície (AR – S) e no topo (AR – T), respectivamente.

Figura 23 – Ensaio de arrancamento de parafuso na superfície e corpo de prova.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 24 – Ensaio de arrancamento de parafuso no topo e corpo de prova.



Fonte: Próprio autor (2024).

4.4 Condutividade térmica dos painéis

O ensaio de condutividade térmica foi realizado no Laboratório de Construções e Ambiente, FZEA/USP, em Pirassununga – SP. Foram utilizadas três amostras de cada

tratamento, as quais eram circulares e possuíam diâmetro de 50 mm. O ensaio de condutividade térmica foi realizado seguindo os parâmetros especificados na norma ASTM E1530 (2011), utilizando-se o equipamento DTC – 300 Model 2022, o qual realiza o ensaio em regime estacionário. As análises foram realizadas em temperatura de 20 °C durante o período de 90 minutos. Os resultados obtidos foram comparados e analisados estatisticamente por meio do software Minitab 18, realizando a análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey, com significância de 95%. A Figura 25 contém os corpos de prova e o ensaio realizado.

Figura 25 – Corpos de prova e ensaio de condutividade térmica.



Fonte: Próprio autor (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos painéis de partículas de madeira e poliestireno expandido

5.1.1 Análise granulométrica

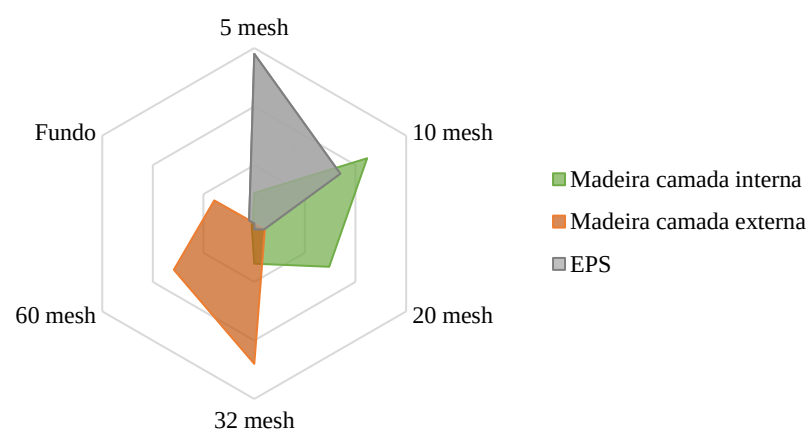
A Tabela 4 contém os dados da distribuição das partículas de madeira, tanto as utilizadas para a camada externa quanto interna do painel, e das partículas de EPS, com a massa retida em gramas e as respectivas porcentagens retidas em cada peneira. O Gráfico 11 contém as porcentagens das partículas retidas em cada peneira com o intuito de ser mais fácil perceber a composição e a diferença entre as partículas.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica das partículas de madeira e EPS

Abertura peneira (mesh)	Abertura peneira (mm)	Média massa retida (g)			Média massa retida (%)		
		Madeira interna	Madeira Externa	EPS	Madeira interna	Madeira Externa	EPS
5	3,962	5,23	0,10	2,90	10,47	0,20	58,00
10	1,651	22,30	0,03	1,70	44,60	0,07	34,00
20	0,833	14,80	2,10	0,20	29,60	4,20	4,00
32	0,495	6,87	24,00	0,10	13,73	48,00	2,00
60	0,246	0,50	15,87	0,00	1,00	31,73	0,00
Fundo	<0,246	0,30	7,90	0,10	0,60	15,80	2,00
Total		50,00	50,00	5,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 11 - Distribuição granulométrica em formato radar



Fonte: Próprio autor (2024).

Observando a quantidade de massa e porcentagem retida nas peneiras, nota-se que, para partículas de madeira da camada interna (partículas grossas), a maior parte das partículas estão retidas nas peneiras de 10 e 20 *mesh*, representando aproximadamente 74,20% de material, levando a concluir que as partículas de madeira do núcleo do painel possuem tamanhos majoritariamente entre 0,833 mm e 1,651 mm. Para as partículas de madeira utilizadas para as camadas superficiais do painel, a maior parte do material ficou retida nas peneiras de 32, 60 e no fundo do equipamento, representando aproximadamente 95,53% do material, ou seja, partículas menores que 0,833 mm e responsáveis por um melhor acabamento superficial.

Foram encontrados resultados semelhantes para a distribuição granulométrica das partículas da camada interna com trabalhos que realizaram o mesmo procedimento, como: Sugahara (2018), com distribuição granulométrica das partículas de eucalipto com 89,37% entre 16 e 30 *mesh* (1,19 mm e 0,595 mm); Bertolini (2014) com 88,48% de partículas de *Pinus sp.* retidos entre 10 e 30 *mesh* (2 mm e 0,595 mm); e Rauber (2011) com 99,21% partículas de *Eucalyptus grandis* entre os tamanhos de 2,0 mm e 0,85 mm.

Com a intenção de avaliar as propriedades de acordo com o tamanho das partículas de madeira, Araújo (2016) produziu painéis de madeira de *Eucalyptus sp.* variando o tamanho das partículas da camada externa e interna e constatou que o tratamento com melhor desempenho físico e mecânico foi aquele com maior quantidade de partículas menores, neste caso da literatura, com 30% partículas de 9 *mesh* e 70% partículas de 16 *mesh*, ou seja, as partículas menores garantiram menor quantidade de vazios e maior densidade, proporcionando melhores propriedades.

Iwakiri (2005), em literatura tradicional da área de painéis, destaca que partículas maiores devem ser utilizadas no interior do painel, pois estas garantem maior resistência mecânica, por outro lado, as partículas menores devem ser utilizadas na superfície do painel, cuja função é garantir melhor qualidade superficial, logo, melhores propriedades relacionadas, como dureza e ligação interna (IRLE, 2012).

Além disso, os autores Osarenmwindá e Nwachukwu (2007) verificaram a influência do tamanho das partículas de casca de arroz nas propriedades mecânicas e físicas de painéis aglomerados e concluíram que, conforme o tamanho das partículas aumentavam, as

propriedades mecânicas de MOR, MOE e RTP, assim como as físicas de IE e AA, foram inferiores. Desta forma, infere-se que partículas menores garantem melhores propriedades para os painéis, pois proporcionam menor número de vazios internos e maior estabilidade dimensional.

Ao analisar o EPS, a grande maioria das partículas se concentraram nas peneiras de 5 e 10 *mesh*, representando cerca de 92,00% do material utilizado e indicando que o tamanho das esferas de EPS são, em sua maioria, maiores que 1,651 mm. Alguns autores também realizaram o procedimento, como Dantas (2019), em que 100% das partículas de EPS ficaram retidas na peneira com abertura de 2,380 mm e Ozório (2016), que analisou partículas de EPS, porém de dois fornecedores distintos, denominando as partículas como EPS-A e EPS-B e ambas as partículas eram quase que 100% maiores que 1,2 mm, porém, 98% das partículas de EPS-A foram retidas pela peneira de 2,4mm, enquanto 77% das partículas de EPS-B ficaram retidas na mesma peneira.

Observando a literatura de Chung et al. (2018), a qual estuda sobre a influência do tamanho e distribuição das esferas de EPS para as propriedades mecânicas de um concreto mais leve, os autores levaram em conta que o EPS é um material de baixa densidade e isolante, possuindo baixa condutividade térmica e acústica, viabilizando sua utilização como agregado leve. Como resultados, de acordo com a variação granulométrica para o mesmo volume de EPS, os autores observaram que quanto menor a granulometria, maior a resistência a compressão do concreto, porém, a condutividade térmica é favorecida com granulometria maior.

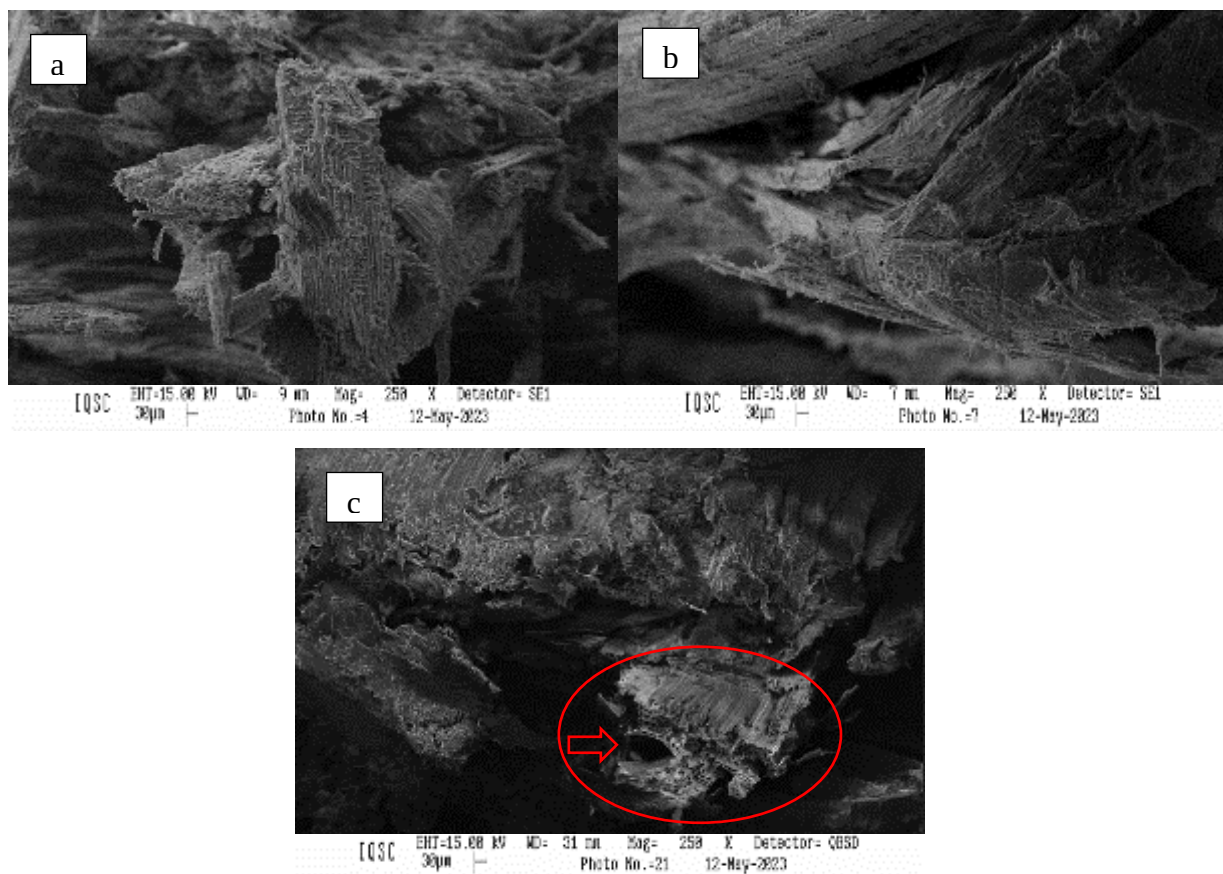
Ressalta-se que, o tamanho adotado das partículas de EPS maiores que as partículas de madeira no trabalho realizado era proposital, buscando manter mais vazios internos no painel e maior quantidade de ar do interior do EPS, o que seria positivo para a condução de calor pelo painel.

5.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura – painéis de partículas

O MEV foi empregado para verificar a estrutura do painel aglomerado de partículas e a interação entre os materiais (LAKREB, 2018). A Figura 26 contém imagens com resolução de 30 μm com aproximação de 250 vezes nas três amostras de painéis, evidenciando a estrutura

da madeira, o rompimento das partículas e a presença de vazio (imagem c destacado pela seta vermelha).

Figura 26 – Imagens de MEV com visão geral da estrutura do painel de madeira: (a) T1 – estrutura da madeira; (b) T2 – região de ruptura da partícula de madeira; (c) T3 – estrutura da madeira com vazio.



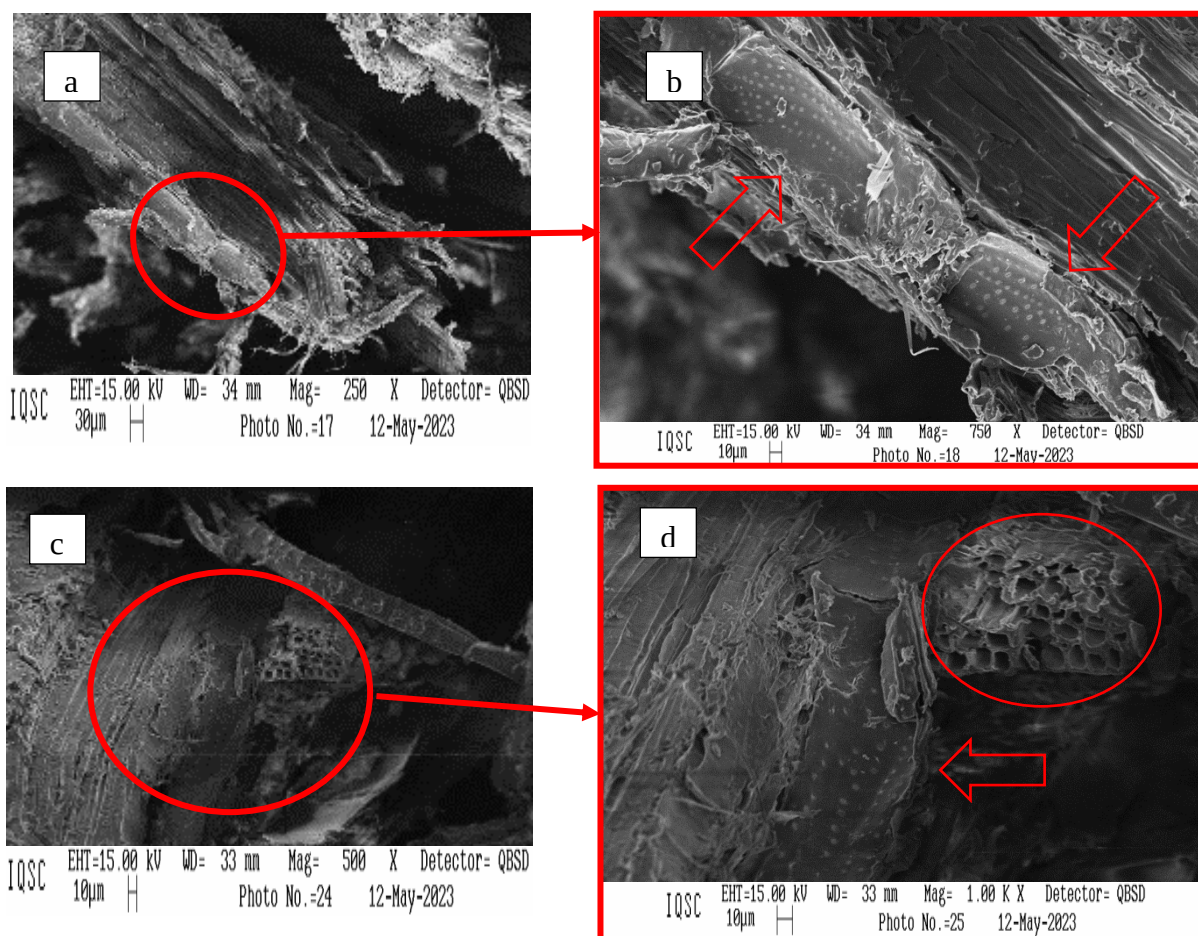
Fonte: Próprio autor (2024).

Na Figura 26 (a) é perceptível visualizar irregularidades acentuadas na superfície da partícula, mostrando o modo de ruptura no ensaio de flexão. A figura 26 (b) mostra a orientação da partícula de madeira e a direção da sua ruptura, e ainda, é possível verificar alguns vazios na estrutura, não somente inerentes à anatomia da madeira, como os vasos, mas relacionadas à ligação interna no painel. Ao observar a Figura 26 (c), onde houve uma ruptura perpendicular ao sentido da estrutura da partícula de madeira, nota-se a presença de muito vazios. O local em destaque mostra um vazio dentro da estrutura do painel, por outro lado, a região compreendida dentro do círculo vermelho é composta por vazios de tamanho reduzido que, de acordo com os autores Pereira (2015) e Drew et al. (2010) espécies de eucalipto possuem estrutura anatômica heterogêneas e essa região pode ser caracterizada pela presença de vasos (poros) de condução.

Com relação a distribuição da resina poliuretana a base de óleo de mamona, é possível observar sua distribuição sobre as partículas de madeira e sua estrutura. A Figura 27 contém 4 micrografias do tratamento 3, sendo a imagem “a” e “b” observadas no mesmo local da amostra, porém com resolução de 30 μm com aproximação de 250 e resolução de 10 μm com aproximação de 750 vezes, respectivamente. A mesma análise vale para as imagens “c” e “d”, porém as resoluções foram de 10 μm com aproximações distintas, de 500 e 1.000 vezes, respectivamente. Nas micrografias há o destaque da estrutura da madeira (Figuras 27 (c) e (d)) e partículas cobertas por camada de resina, sendo possível observar a adesão da resina na superfície das partículas de madeira, demonstrando boa interação entre esses dois materiais.

Melo et al. (2023) relatou em seu estudo que a utilização desta resina colabora para um melhor empacotamento das fibras de madeira de eucalipto, diminuindo os defeitos. Wechsler-Pizarro e Núñez-Decap (2022) avaliaram painéis de partículas de pinha, eucalipto e pinus radiata com resina de ureia formaldeído e poliuretana a base de óleo de mamona, e concluíram que a resina poliuretana juntamente com as partículas de eucalipto favoreceram uma resistência a flexão maior, além disso, onde a resina contribuiu para um melhor encapsulamento das partículas de madeira, auxiliando na melhora das propriedades de resistência a umidade, com a diminuição do inchamento em espessura.

Figura 27 - Imagens de MEV com destaque da resina sob as partículas de madeira (setas vermelhas): (a) T3 – pontos característicos da resina; (b) ampliação da imagem “a”; (c) T3 – estrutura da madeira destacada pelo círculo e pontos de resina; (d) ampliação da imagem “c”.



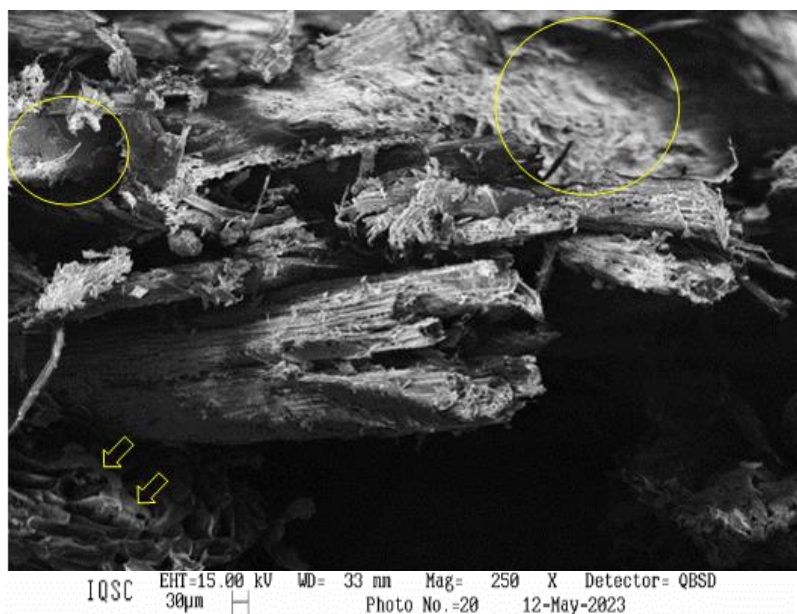
Fonte: Próprio autor (2024).

Corroborando com este argumento, Bertolini (2014) também observou por micrografias de painéis de *Pinus* sp. e adesivo PU de mamona que o adesivo se fixa na superfície das partículas de madeira. Os autores Oliveira Júnior et al. (2023), produziram painéis de serragem de eucalipto com resina poliuretana a base de óleo de mamona adicionando chamote (resíduos de peças cerâmicas) e verificando sua influência nas propriedades. Por meio de MEV, os autores observaram a boa adesão entre as fibras de eucalipto à matriz polimérica (resina), explicando o bom desempenho mecânico nas propriedades analisadas, como tensão perpendicular.

A Figura 28 apresenta uma micrografia do tratamento 3, sendo possível verificar os três materiais utilizados para a produção do painel de partículas. A estrutura composta por pontos da resina poliuretana a base de óleo de mamona está apontada pela seta amarela, assim

como a região contendo o EPS, destacada pelo círculo amarelo. É possível realizar uma comparação do EPS com a resina, pois a resina atua como uma camada de cobertura das partículas, enquanto o EPS não, ele manteve sua estrutura íntegra, não atuando como material fundido. Entretanto, observa-se uma boa interação entre o EPS e as partículas de madeira, pois não há um vazio entre estes materiais.

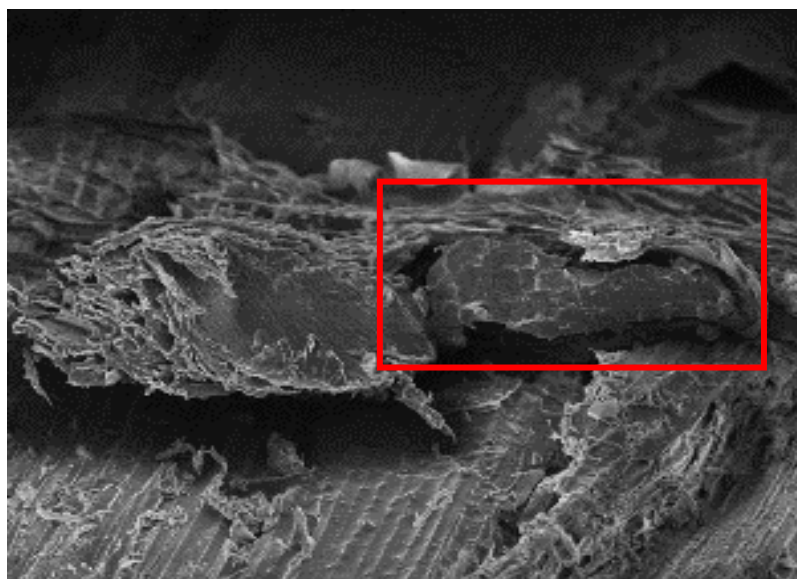
Figura 28– imagem de MEV com visão da estrutura da madeira, EPS e resina.



Fonte: Próprio autor (2024).

A estrutura do EPS também pode ser observada na imagem contida na Figura 29.

Figura 29 – imagem de MEV com visão da estrutura do EPS.



Fonte: Próprio autor (2024).

Na Figura 29 é possível observar o EPS, uma estrutura irregular poliédrica perpendicularmente ao corte e mais lisa contida no destaque em vermelho.

Com relação as imagens observadas e os ensaios físicos e mecânicos apresentados nos tópicos seguintes, pode-se dizer que o painel produzido foi um produto rígido e com boa distribuição e interação entre os materiais. Conforme citado por Bollakayala et al. (2022), o EPS e a madeira apresentam boa interação e colagem, contribuindo para formação de um compósito rígido e uniforme.

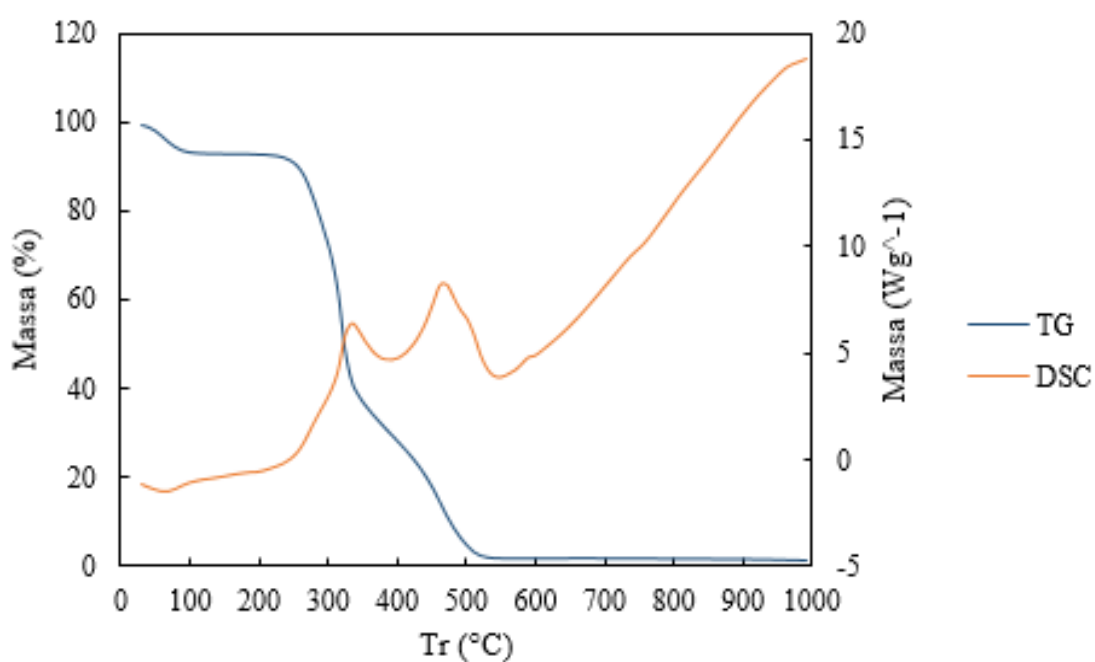
Com relação a estrutura do EPS observado, alguns autores fizeram ponderações semelhantes, como Schmidt et al. (2011), Bosche et al. (2017) e Aydogmus et al. (2022), os quais caracterizaram a estrutura do EPS como poliédrica e sendo mais porosa internamente. Simpson et al. (2020) notaram em seus estudos que a estrutura do EPS é composta por uma matriz celular poliédrica preenchidas com ar, em diversas dimensões celulares. Além disso, os autores observaram que as paredes celulares parecem ser geralmente fechadas, entretanto, quando mantido em elevadas temperaturas (70°C) por longos períodos podem surgir perfurações nas membradas do EPS. É improvável que essas perfurações afetem a condutividade térmica do material, no entanto, de acordo com a quantidade e tamanho dessas perfurações é possível que elas sejam uma ameaça para a baixa condutividade térmica do material, pois podem ocorrer transferência de calor por meio de pequenas correntes de convecção.

Shi et al. (2022) produziram concretos com partículas de EPS impregnados com retardantes de chama e observaram a superfície lisa do EPS, além da sua estrutura porosa e poliédrica. Os autores verificaram que a porosidade do EPS é uma vantagem para retardar o surgimento de chamas. Kioupis et al. (2023) corroboram com a ideia de porosidade e estrutura poliédrica do EPS, dado que os autores produziram um geopolímero utilizando resíduos de tijolos e de EPS e espuma de poliuretano, tendo como resultado das suas micrografias por MEV o EPS descomprimido, ou seja, com ar em seu interior, o que contribuiu para redução da densidade do compósito.

5.1.3 Análises termogravimétricas (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC)

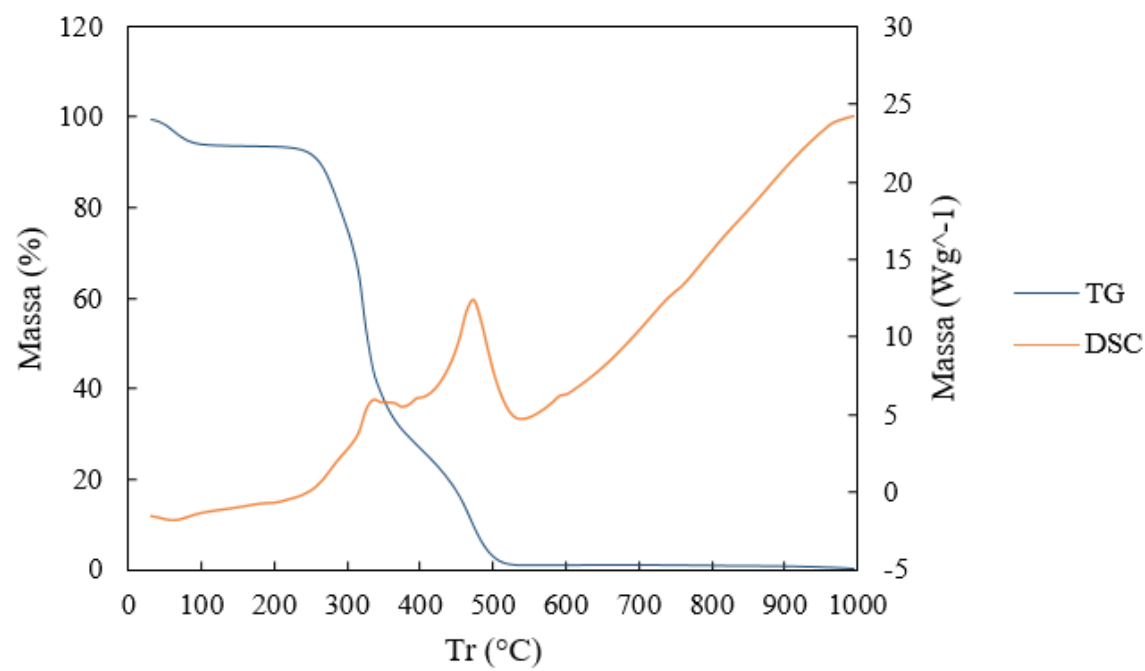
Os Gráficos de 12 a 14 apresentam as curvas termogravimétricas em azul e a calorimetria exploratória diferencial em laranja referentes aos painéis testemunha (tratamento 1), painéis com 25% de EPS (tratamento 3) e do poliestireno expandido puro.

Gráfico 12 - Curva TGA/DSC painel 100% madeira (tratamento 1).



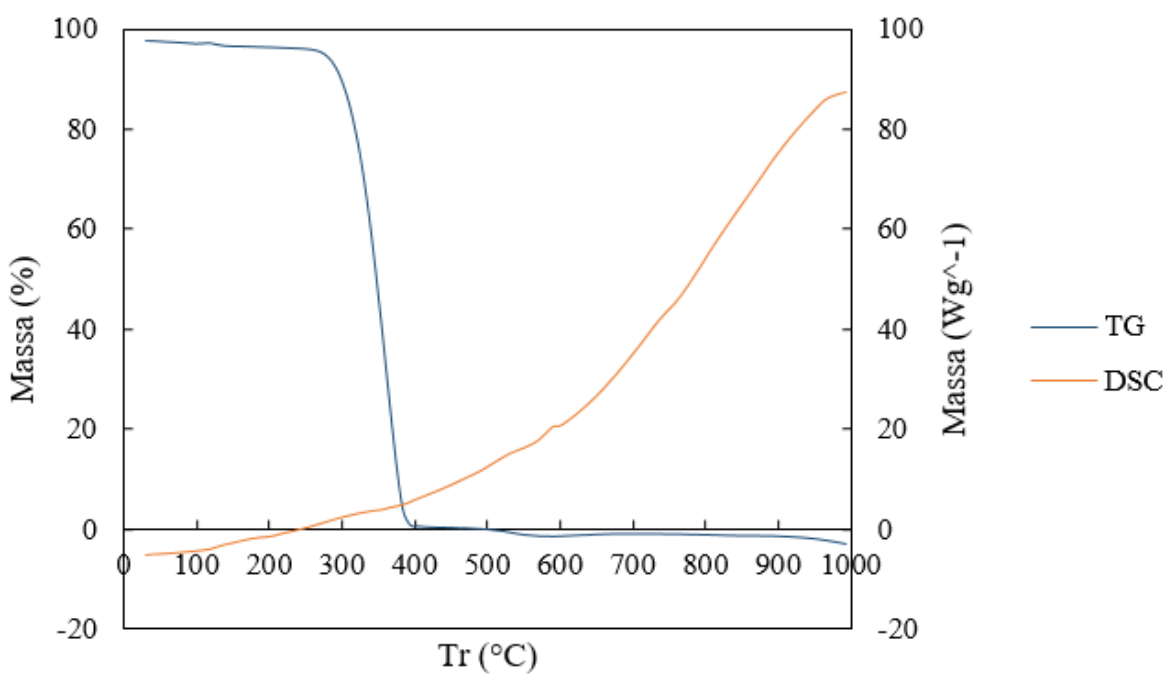
Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 13 - Curva TGA/DSC painel com 25% EPS (tratamento 3).



Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 14 - Curva TGA/DSC poliestireno expandido puro.



Fonte: Próprio autor (2024).

As etapas observadas para cada amostra, assim como seus intervalos de temperaturas e massa perdida devido a degradação térmica, podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Intervalo de temperatura e perda de massa das curvas TGA.

Amostra	1° Etapa		2° Etapa		3° Etapa		Resíduos (%)
	Intervalo de Tr (C°)	Perda de Massa (%)	Intervalo de Tr (C°)	Perda de Massa (%)	Intervalo de Tr (C°)	Perda de Massa (%)	
Tratamento1	30 - 236	7,32	236 - 354	55,85	354 - 531	33,90	2,43
Tratamento3	30 - 236	6,66	236 - 354	56,94	354 - 511	34,05	1,69
EPS	30 - 266	1,99	266 - 394	94,94	-	-	0,70

Fonte: Próprio autor (2024)

Analisando os Gráficos de 12 a 14 e a Tabela 5, resultado destes gráficos, é possível notar que ocorre perda de massa em três etapas, particularmente para as amostras de painéis, tratamentos 1 e 3. Nota-se que os painéis apresentaram desempenho semelhantes, tendo a primeira etapa de perda de massa na faixa de temperatura de 30 a 236°C, correspondendo a 7,32% e 6,66% de massa perdida (curva TG – azul) para os tratamentos 1 e 3, respectivamente. Bollakayala et al. (2023) relaciona a temperatura até 240°C com a perda de massa relacionada com a evaporação de umidade e de produtos voláteis presentes nas amostras.

A partir da temperatura de 236°C inicia-se a degradação térmica das amostras, terminando em temperaturas superiores a 500°C e resultando em 2,43% e 1,69% de resíduos para os tratamentos 1 e 3, respectivamente. Durante a degradação térmica observa-se duas etapas, correspondentes as etapas 2 e 3 presentes na Tabela 5. Deste modo, a etapa 2 representa o primeiro estágio de degradação térmica, ocorrendo na faixa de temperatura de 236 a 354°C para as duas amostras de painéis e sendo confirmado pelo primeiro pico na curva DSC (laranja). A perda de massa foi semelhante para os tratamentos 1 e 3, sendo de 55,85% e 56,94%, respectivamente. Por fim, o segundo estágio de degradação térmica e representado pela 3° etapa ocorre na faixa de temperatura de 354 a 531°C, com perda de 33,90% em massa para a amostra do tratamento 1 e, para o tratamento 3, a faixa de temperatura é de 354 a 511°C, observando 34,05% de perda de massa.

O modo como ocorreu a degradação térmica nos tratamentos 1 e 3 (em duas etapas) já era algo esperado de acordo com a literatura, visto que nos estudos conduzidos pelos autores Bertolini (2014) e Bollakayala et al. (2023), que produziram painéis de madeira adicionando

borracha de pneu e EPS como polímeros incluídos, respectivamente por autor, também foi observado uma degradação térmica em duas etapas. Ainda de acordo com a literatura, o início da degradação térmica está condizente com a temperatura próxima a 240°C, dado que a degradação da fibra natural se inicia por volta desta temperatura, considerando que os compostos como lignina, celulose e hemicelulose são afetados pela temperatura (JI et al. 2021).

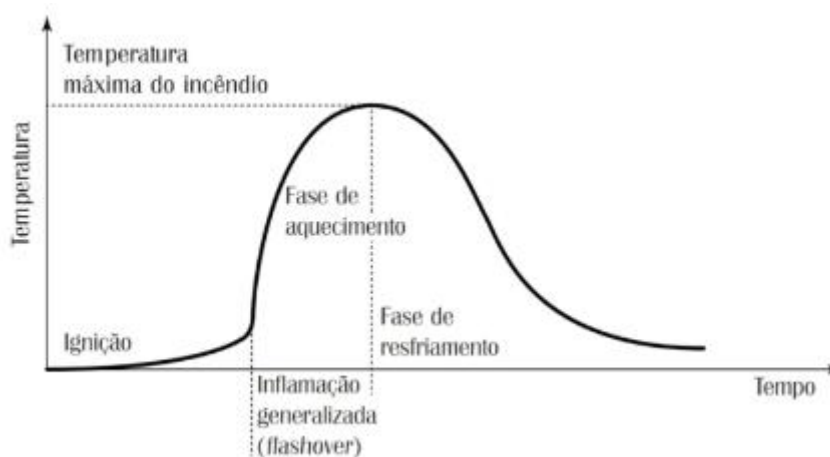
Por outro lado, avaliando a amostra de EPS puro, foram observadas duas etapas de perda de massa, em que a primeira ocorreu na faixa de temperatura de 30 a 266°C, correspondendo a 1,99%, e a segunda ocorreu na faixa de temperatura de 266 a 394°C. a segunda faixa de temperatura corresponde a única etapa de degradação térmica, em que houve a perda de 94,94% de massa, resultando em 0,70% de resíduos. De acordo com o Gráfico 14, a partir de 266° se inicia a degradação até que reste somente resíduos e todo material fosse decomposto, é fato é confirmando pela ausência de picos na curva DSC (laranja), havendo somente seu crescimento até o término da degradação. A massa perdida pode estar relacionada com a perda de ar no interior das esferas de poliestireno expandido, devido a sua composição ser majoritariamente ar interno, como também a decomposição térmica do composto em si. Schmidt et al (2011) realizou análises termogravimétricas de poliestireno extrudado e expandido e teve com resultado curvas semelhantes, relacionando a perda de massa com o ar das esferas e decomposição do material.

Com isso, a inclusão de poliestireno expandido em painéis de partículas não resultou em uma degradação térmica mais acelerada ou em faixas de temperaturas inferiores (tratamentos 1 e 3), no entanto, quando exposto a elevadas temperaturas, sua decomposição térmica ocorre de maneira única (Gráfico 14), deixando visível o risco em altas temperaturas e salientando a grande relevância do modo de montagem. Fato é que o EPS é extremamente inflamável, com o índice de inflamabilidade (índice limite de oxigênio – LOI) de apenas 18,0%, e ainda, é de fácil ignição com queima rápida, levando a liberação de calor e produção de fumaça preta tóxica durante a combustão (YU et al, 2010; ZHOU et al, 2016). Devido a isso, o EPS é uma potencial ameaça a vida humana nestas condições de incêndio, favorecendo o a propagação do fogo quando utilizado de forma inadequada.

Para que haja um maior entendimento, um incêndio ocorre em três fases, iniciando-se com a etapa de ignição, em que ocorre o aumento da temperatura de forma lenta e a liberação de gases tóxicos e asfixiantes. Na primeira etapa não há risco estrutural e existe a possibilidade de extinção do incêndio de forma mais rápida e fácil. A segunda fase é denominada de

flashover, sendo a responsável pela inflamação generalizada do ambiente. Esta é a fase em que o incêndio crescerá e todo o ambiente entrará em combustão, com temperaturas próximas a 700°C, gases e vapores oriundos da pirólise de materiais sólidos e líquidos preencherão todo o ambiente, deixando o ambiente tomado por chamas até que todo o combustível seja consumido. A próxima etapa se dá pela redução do oxigênio no ambiente (<15%), contribuindo para redução gradual da temperatura e resfriamento do ambiente, passando as chamas para aspecto de brasas (MATTELLI, 2020; ROCHA, 2020; SANTOS, 2021). A Figura 30 contém a representação do desenvolvimento de um incêndio de acordo com suas etapas decorrentes do avanço da temperatura pelo tempo.

Figura 30 - Curva geral de desenvolvimento de incêndio



Fonte: SILVA (2012).

Visto a periculosidade de um incêndio, faz-se necessário melhor entender como os materiais se comportarão em condições de incêndio, com isso, há alguns estudos sobre compósitos com EPS, entre eles o trabalho realizado por Tsai (2009), em que houve a análise da influência de certos compostos em materiais de revestimento de paredes em situações de fogo e, ainda em seu trabalho, o autor cita o estudo realizado pela *Association for European Manufacturers of Expanded Polystyrene* (EUMEPS, 2004), verificando a necessidade de utilizar um material para proteger o EPS em condições de incêndio em edificações. Os compostos analisados foram uma placa de silicato de cálcio (12,5 mm de espessura e 800 kg/m³ de densidade), gesso cartonado (12,5 mm de espessura e 730 kg/m³ de densidade), fibrocimento A (12,3 mm de espessura e 1060 kg/m³ de densidade) ou fibrocimento B (6 mm de espessura e

1800 kg/m³ de densidade) e, até mesmo, painel de madeira (12mm de espessura e 700 kg/m³ de densidade) para proteger o EPS em condições de incêndio. Os painéis de madeira foram estudados e são uma opção contra incêndios em razão da estrutura da madeira, visto que ela possui lignina em sua composição e, de acordo com a literatura, até mesmo baixas quantidade (10%) já aumentam a resistência das fibras naturais contra incêndios (MNGOMEZULU et al. 2014).

5.2 Propriedades físicas e mecânicas

Os resultados obtidos na primeira etapa do estudo, para as propriedades físicas e mecânicas das três amostras de painéis, foram comparados com a Tabela 6 a qual apresenta os requisitos das normas NBR 14810 (2018), ANSI A.208.1 (1999) e ANSI A.208.1 (2016).

Tabela 6 - Requisitos normativos.

Propriedade	Requisitos Normativos				
	ABNT NBR 14810 (2018)	ANSI A.208.1 (1999)		ANSI A.208.1 (2016)	
Tipo de painel	Tipo P2*	LD-1**	LD-2**	LD-2**	M-S***
D (g/cm ³)		<0,64	<0,64	<0,64	0,60 – 0,65
TU (%)	5 a 13	-	-	-	-
IE (%)	22	-	-	-	-
MOR (N/mm ²)	11,00	3,00	5,00	2,8	11,00
MOE (N/mm ²)	1800	550	1025	500	1700
RTP (N/mm ²)	0,40	0,10	0,15	0,14	0,36
AR – S (N)		400	550	520	800
AR – T(N)		NS	NS	NS	700

* Requisitos para painéis com espessura nominal de 6 a 13 mm, não estruturais para uso interno em condições secas (Tipo P2). ** Requisitos para painéis de baixa densidade utilizados como núcleo de portas (Tipo LD-1 e LD-2). *** Requisitos para painéis de média densidade para uso comercial e exterior industrial quando resistente a água, com diferentes faixas de densidade.

Fonte: Adaptado de NBR 14810 (2018), ANSI A.208.1 (1999) e ANSI A.208.1 (2016).

Os dados apresentados nas Tabela 7e Tabela 8, a seguir, apresentam os resultados obtidos para as propriedades físicas dos painéis, em que foram analisadas a densidade, teor de umidade, inchamento em espessura durante 2 e 24 horas e absorção de água durante 2 e 24 horas.

Tabela 7 - Propriedades físicas: Densidade e teor de umidade.

Tratamento	D (g/cm³)	TU (%)
1 Testemunha (sem EPS)	0,57 A (8,85)	6,42 A (16,16)
2 EPS no núcleo (12,5% EPS)	0,55 A (7,71)	5,51 B (7,94)
3 EPS no núcleo (25,0% EPS)	0,56 A (9,15)	5,32 B (8,13)

*valores entre parênteses representam o coeficiente de variação. Médias seguidas de letra iguais, para a mesma propriedade e período de análise, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Observando a densidade das amostras produzidas, é notório que as três possuem valores próximos e são equivalentes estatisticamente, levando a concluir que a adição de 12,5% e 25,0% de EPS de forma dispersa em partículas de eucalipto da camada interna não influenciaram na densidade final dos painéis de partículas. A proximidade das densidades já era algo esperado, uma vez que a quantidade de madeira e resina foram alteradas de acordo com a quantidade de EPS proposta, objetivando para todas as amostras a densidade nominal de 0,55 g/cm³. Avaliando o tipo de painel de acordo com a faixa de densidades encontrada nas normas ANSI A.208.1 (1999) e ANSI A.208.1 (2016), os painéis deste estudo foram classificados como baixa densidade (*low density* – LD), com densidade inferior a 0,64 g/cm³, podendo ser classificados como LD-1 ou LD-2. Importante ressaltar que ao comparar os requisitos observados na mesma norma ANSI A.208.1, porém de anos diferentes, os requisitos encontrados na norma de 2016 são inferiores, visto que esta norma apresenta mais faixas de densidade e classificações de acordo com as propriedades mecânicas dos painéis.

Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 14810 (2018), Tabela 4, o teor de umidade deve estar entre 5 e 13%, desta forma, todos os painéis analisados atenderam a este requisito. Outra avaliação pertinente a se fazer é que os painéis com EPS em sua composição apresentaram menor teor de umidade (amostra 2 – 5,51%; amostra 3 – 5,32%) e ainda apresentaram diferentes estatisticamente com relação a amostra contendo somente partículas de madeira, demonstrando que a inclusão de EPS influencia positivamente no teor de umidade.

Tabela 8 - Propriedades físicas: Inchamento em espessura e Absorção de água.

Tratamento	IE-2h (%)	IE-24h (%)	AA-2h (%)	AA-24h (%)
1 Testemunha (sem EPS)	5,90 A (14,22)	12,44 A (12,36)	13,78 A (20,69)	28,07 A (13,11)
2 EPS no núcleo (12,5% EPS)	4,90 B (12,79)	13,85A (14,76)	12,13 A (12,77)	26,33A (7,81)
3 EPS no núcleo (25,0% EPS)	5,30 A B (20,51)	13,20 A (10,33)	13,95 A (8,55)	28,70 A (7,91)

*valores entre parênteses representam o coeficiente de variação. Médias seguidas de letra iguais, para a mesma propriedade e período de análise, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Avaliando a propriedade de inchamento em espessura, a norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (2018) estabelece para painéis não estruturais e aplicados em condições secas que o requisito mínimo não deve ultrapassar 22% de inchamento em espessura durante 24 horas. Desta forma, todos os tratamentos apresentaram melhor desempenho para este requisito, com valores entre 12% e 14%. Comparando os resultados entre si, os painéis se mostraram equivalentes estatisticamente para o período de 24 horas, porém, para o período de 2 horas, os painéis com EPS apresentaram desempenho superior e são estatisticamente diferentes à amostra contendo somente madeira em sua composição, a qual teve desempenho inferior, ou seja, maior inchamento em espessura neste período.

Com relação a propriedade de absorção de água, tanto para o período de 2 horas quanto para 24 horas, a inclusão de EPS não mostrou influência para esta propriedade, visto que as amostras de painéis são consideradas equivalentes estatisticamente. Com isso, para as propriedades físicas estudadas, a inclusão de EPS se mostrou influente positivamente para o teor de umidade e inchamento em espessura durante 2 horas.

É possível realizar algumas avaliações a respeito das propriedades físicas, em que os resultados foram estatisticamente iguais e podem estar relacionados com o modo de produção e configuração das partículas. Uma observação pertinente está relacionada a variável de temperatura de prensagem, sendo está intimamente relacionada com o estado do polímero no núcleo do painel e, por meio das imagens de MEV não é possível observar a fusão do EPS, pois caso houvesse, o EPS ajudaria nas propriedades associadas a absorção de água atuando como impermeabilizante contra água, formando uma camada de proteção para as partículas de madeira. Observando a configuração do painel, com partículas de EPS somente no núcleo,

torna-se possível afirmar que a responsável pela impermeabilização da superfície do painel contra água é, em grande parte, a resina poliuretana a base de óleo de mamona.

Andrade et al. (2017) produziram painéis com biomassa residual do coco babaçu, dividido em partículas de epicarpo e endocarpo, com adição de maravalha de *Pinus* sp., utilizando como adesivo a resina poliuretana bicomponente a base de óleo de mamona. Como resultado, os autores obtiveram os melhores resultados de inchamento em espessura e absorção de água para a composição contendo 50% partículas de epicarpo e 50% partículas de *Pinus* sp., sendo 45,50% e 70,10%, respectivamente.

Os autores Abdulkareem et al. (2017) e Bollakayala et al. (2022) estudaram compósitos formados por serragem de madeira e EPS reciclado, os estudos revelaram aumento significativo das propriedades mecânicas e uma redução da absorção de água com o aumento da quantidade de EPS, visto que os compósitos foram prensados a 160°C, fazendo com que o EPS se fundisse, contribuindo para união mais uniforme com a serragem e desempenhando a função de uma película resistente a água, corroborando com a ideia de que os polímeros como o EPS são hidrofóbicos e, quando utilizados em conjunto com outros materiais, auxiliam na redução da absorção de água. Deste modo, conclui-se que a adição de EPS contribui para a melhor desempenho nestas propriedades, assim como a resina utilizada e a composição adequada da matéria-prima, quando comparado à literatura citada.

Rodrigues (2022) produziu painéis constituídos por maravalha de madeira de pinus e eucalipto (massa seca – 50% cada espécie) e utilizou como resina (adesivo) uma mistura de poliestireno expandido e resina poliuretana bicomponente a base de óleo de mamona, variando as quantidades entre os polímeros. Como resultados, o autor observou uma redução do teor de umidade, inchamento em espessura e absorção de água de acordo com o aumento da quantidade de EPS no painel, comprovando os aspectos positivos do EPS com relação a estas propriedades. Ao comparar o trabalho realizado por Rodrigues com este estudo, para a amostra que mais se assemelha a este trabalho, ou seja, amostra com 3 e 5% de EPS, o autor obteve para inchamento em espessura 32,74% e 38,06% em 24 horas, respectivamente, valores correspondentes a mais que o dobro do que aos obtidos por este estudo. Para a propriedade de absorção de água, para as mesmas quantidades de 3 e 5% EPS, o autor obteve 77,66% e 75,89% em 24 horas, respectivamente, valores acima dos valores obtidos por este trabalho. Desta forma, as composições estudadas de partículas de eucalipto, com resina poliuretana bicomponente a base de óleo de mamona com 12,5% ou 25% de EPS apresentaram desempenhos superiores às composições abordadas pela literatura citada, ressaltando-se que o EPS deste estudo

desempenhou em grande parte papel de reforço, em sua forma íntegra (sem fusão como na literatura) e não de impermeabilizante como na literatura (EPS fundido).

As Tabela 9 e Tabela 10 contém os resultados dos ensaios mecânicos nos painéis, sendo estes a resistência à flexão (MOR), módulo de elasticidade (MOE), resistência à tração perpendicular às faces (RTP) e arrancamento de parafuso na superfície e no topo.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos painéis: MOR, MOE e RTP.

Tratamento	MOR (MPa)	MOE (MPa)	RTP (MPa)
1 Testemunha (sem EPS)	10,7 A (27,65)	2089 A (27,91)	0,48 A (47,53)
2 EPS no núcleo (12,5% EPS)	8,8 A (41,00)	2056 A (45,46)	0,63 A (44,48)
3 EPS no núcleo (25,0% EPS)	10,0 A (33,74)	2271 A (17,65)	0,62 A (26,10)

*valores entre parênteses representam o coeficiente de variação. Médias seguidas de letra iguais, para a mesma propriedade e período de análise, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Observando as propriedades de MOR e MOE, a norma ABNT NBR 14810-2 (2018) presente na Tabela 6, contém requisitos mínimos estas propriedades. Para a propriedade de MOR, os painéis devem atingir o valor mínimo de 11,0 MPa, enquanto para a propriedade de MOE, o valor mínimo deve ser 1800 MPa. Desta forma, os tratamentos não atingiram o requisito para MOR, porém as amostras 1 (testemunha) e 3 (25,0% de EPS) ficaram próximas ao valor normativo. Em contrapartida, para a propriedade de MOE, todos os painéis atingiram o requisito mínimo, sendo o maior valor obtido pelo painel com 25,0% de EPS. Assim como ocorre para a propriedade de MOE, ocorre com a propriedade de RTP, em que todos os tratamentos foram superiores a 0,40 MPa (requisito mínimo norma ABNT NBR 14810-2) e ainda, os painéis com EPS apresentaram valores superiores para esta propriedade, em aproximadamente 30% quando comparado ao painel testemunha, com a média de 0,63 MPa para o tratamento com 12,5% de EPS. Cabe ressaltar que, segundo a análise estatística, os tratamentos (amostras) deste estudo são equivalentes estatisticamente, ou seja, apesar de médias superiores das amostras com EPS, elas não se diferem do valor encontrado para a amostra sem a adição deste material. Destaca-se também que a norma brasileira se refere à painéis de média densidade e foi utilizada apenas por ser um documento normativo nacional da área.

Avaliando os painéis conforme os requisitos da norma ANSI A.208.1 (1999), todos os painéis atingiram os requisitos mínimos de 5,0 MPa para a propriedade de MOR, 1.025 MPa

para MOE e 0,15 MPa para RTP, caracterizando-os como painéis de baixa densidade do tipo LD-2. Com relação a norma ANSI A.208.1 (2016), todos os painéis atingiram os requisitos mínimos de 2,8 MPa para MOR, 500 MPa para MOE e 0,14 para RTP. Ao comparar os painéis deste trabalho com os requisitos presentes na norma ANSI A208.1 (2016) para painéis de média densidade do tipo M-S, nenhum painel atingiu o requisito mínimo de 11 MPa para a propriedade de MOR, porém, todos os painéis superaram os requisitos de 1700 MPa para MOE e de 0,36 MPa para RTP, indicando suas boas propriedades com uma baixa densidade.

Comparando as três amostras entre si, todas são consideradas equivalentes estatisticamente, demonstrando que a adição de EPS não contribui para redução das propriedades de MOR, MOE e RTP e, especificamente para a propriedade de RTP, a adição de EPS contribuiu para uma melhora de aproximadamente 25% comparado ao tratamento testemunha, podendo concluir que quando o EPS é utilizado misturado as partículas de madeira, ele pode contribuir com o aumento da união entre as partículas, aumentando a resistência à ligação interna. Tal fato pode ter ocorrido devido a temperatura de prensagem do painel de aproximadamente 100°C, que é próxima a temperatura de transição vítrea do polímero EPS, de 100°C, conforme para Callister (2003). Schmidt (2011) apoia este argumento, com suas observações em seu experimento de calorimetria exploratória diferencial do EPS, obtendo valores próximos para a temperatura de transição vítrea, de 106,6°C para o poliestireno expandido, 101,1°C para o poliestireno extrudado e 101,8°C para o poliestireno comprimido. Desta forma, durante a prensagem do painel, o EPS pode ter atingido sua temperatura de mudança de estado, iniciando uma fusão parcial (devido ao rápido tempo de prensagem) e passando a ser um material altamente viscoso, se espalhando por todas as partículas do painel, colaborando, após a diminuição da temperatura e cura do painel, com uma maior adesão e mais força de união entre as partículas internas do painel.

Bekhta et al. (2022) produziram painéis com lâminas industriais de madeira de bétula, com espessura de 1,5 mm e partículas de madeira (20% decíduas e 80% coníferas), grânulos de EPS e resina de ureia formaldeído. Os autores realizaram experimentos variando a densidade e a quantidade de EPS, entre as produções, a composição que mais se assemelha a este estudo foi a que possuía densidade de 0,55 g/cm³ e 10% de EPS. Como resultados, foram obtidos para as propriedades de MOR e MOE aproximadamente, 8 MPa e 1750 MPa, respectivamente, observando uma queda drástica dessas propriedades com relação ao painel sem EPS. Entretanto, os autores analisaram que houve um incremento na resistência a tração perpendicular, atingindo valores próximos a 0,34 MPa e contribuindo com a ideia de que o EPS

atua como um bom aglutinante e aumenta a força relacionada a união das partículas. Com isso, é perceptível que a composição proposta neste estudo possui superioridade para as três propriedades analisadas, tanto para a composição com 12,5% quanto para 25,0% de EPS, com relação à literatura citada.

Yano e Silva (2020) produziram painéis com serragem de diversos tipos de madeira e bagaço de cana de açúcar, utilizando como adesivo a resina poliuretana a base de óleo de mamona. Os autores variaram a composição entre serragem e bagaço de cana e observaram os melhores resultados para o tratamento com 50% serragem e 50% bagaço, sendo eles 11,09 MPa, 2.033,80 MPa e 0,91 MPa, para MOR, MOE e RTP, respectivamente, e uma densidade de 0,73 g/cm³. Ao comparar com este estudo, a composição dos painéis com serragem e bagaço de cana foi superior para a propriedade de MOR e RTP, sendo mais significativa para RTP, e inferior para a propriedade de MOE, demonstrando a superioridade da composição de eucalipto com EPS para esta propriedade mesmo com uma média de densidade menor de 0,56 g/cm³. Desta forma, os resultados obtidos por Yano e Silva (2020) podem ser explicados devido a densidade maior do painel, contribuindo para um RTP mais alto; entretanto, a composição estudada no trabalho em questão apresentou uma densidade menor e valores próximos das propriedades citadas, demonstrando que esta composição possui boas propriedades para um painel mais leve.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas: arrancamento de parafuso na superfície e no topo.

Tratamento	Arrancamento de parafuso na superfície (N)	Arrancamento de parafuso no topo (N)
1 Testemunha (sem EPS)	1055,7A (13,18)	1090,6 A (22,32)
2 EPS no núcleo (12,5% EPS)	975,0 A (20,29)	890,8 A (22,17)
3 EPS no núcleo (25,0% EPS)	989,2 A (26,64)	976,0 A (31,83)

*valores entre parênteses representam o coeficiente de variação. Médias seguidas de letra iguais, para a mesma propriedade e período de análise, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (2018) não estabelece requisitos mínimos para a propriedade de resistência ao arrancamento de parafusos para a superfície ou topo de painéis. Entretanto, as normas ANSI A.208.1 dos anos de 1999 e 2016 estabelecem que, para o tipo de painel LD-2, esta propriedade se aplica somente para a superfície dos painéis, sendo de 550 N e 520 N, respectivamente. Desta forma, todos os tratamentos atingiram este requisito, em que o maior valor foi atingido pelo painel produzido somente com madeira (1090,6 N), seguido pelo painel com 25,0% de EPS (976,0 N). Ademais, os painéis foram considerados

equivalentes estatisticamente, constatando que a inclusão de EPS não interfere negativamente para esta propriedade. Para se ter uma melhor compreensão da propriedade de arrancamento de parafuso, torna-se plausível a comparação com os painéis de média densidade do tipo M-0, pois este tipo já possui requisitos mínimos, sendo 800 N para arrancamento de parafuso na superfície e 700 N para arrancamento de parafuso no topo. Desta forma, todos os painéis atingiram os requisitos mínimos para este tipo de painel de média densidade, mostrando, novamente, as boas propriedades atingidas pelos painéis de baixa densidade deste trabalho. Ressalta-se a importância desta propriedade, uma vez que estes painéis podem ser fixados em estruturas de coberturas em edificações, para atuarem como isolantes.

Boruszewski et al. (2022), verificaram a possibilidade de produção de vários tipos de painéis de partículas com 3 camadas e de baixa densidade utilizando madeira de *Pinus sylvestris L.* com resina de ureia formaldeído e, como variáveis foram a adição partículas de EPS ou microesferas de polimetil metacrilato expandidas ou não expandidas, adicionados na resina da camada central com partículas de tamanho de 4 mm e 8 mm e, também, na quantidade de resina nas camadas externas e interna do painel. Observando os painéis produzidos com EPS e que apresentaram os melhores resultados para o arrancamento de parafuso, a melhor composição foi a que apresentou partículas de 4 mm e quantidade de resina de 10% na camada central e 12% na camada externa. Como resultados foram obtidos 731 N/mm² para arrancamento de parafuso no topo do painel, enquanto para a superfície foi obtido o valor de 964N/mm², sendo inferior a composição estudada no trabalho em questão, ou seja, a composição utilizando partículas de EPS e eucalipto apresentam um desempenho superior para todos os tratamentos analisados.

5.3 Segunda etapa – Condutividade térmica dos painéis

Os resultados obtidos para a condutividade térmica referente aos três tratamentos estão presentes na Tabela 11.

Tabela 11 - Condutividade térmica das amostras 2ª etapa.

Amostra	Condutividade térmica – λ (W/m.K)
1 Testemunha (sem EPS)	0,1553 A (2,44)
2 EPS no núcleo (12,5% EPS)	0,1493 A (1,55)
3 EPS no núcleo (25,0% EPS)	0,1496 A (1,68)

*Médias seguidas de letras iguais se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ** (coeficiente de variação)

De acordo com os resultados do ensaio para avaliar a condutividade térmica e conforme a análise estatística, é notório que a adição de EPS não resultou em amostras diferentes estatisticamente. Por outro lado, as amostras com EPS em sua composição apresentaram valores médios menores, demonstrando que a adição deste polímero pode possivelmente contribuir para redução da condutividade térmica, talvez se modificadas as quantidades de EPS e condições de produção, como pressão de prensagem, uma vez que a elevada pressão pode ter contribuído para o rompimento das esferas de EPS e, conseqüentemente, saída de parte do ar interno das partículas, prejudicando sua característica de isolamento térmico.

De acordo com a norma brasileira ABNT 15220 (2003), painéis de aglomerado de partículas de madeira com densidade entre 0,55 e 0,65 g/cm³ apresentam condutividade térmica em torno de 0,14 W/m.K e, o valor obtido neste trabalho foi próximo e de acordo com o estabelecido nesta norma, 0,1493 W/m.K para o painel com 12,5% de EPS.

Ao analisar a literatura de Lu et al. (2021), os autores obtiveram uma redução da condutividade térmica de painéis de partículas sem EPS de 0,120 W/(m·K) para 0,047 W/(m·K) para painéis de EPS, ou seja, a literatura corrobora com o fato de que o EPS influencia e pode melhorar o isolamento térmico. Além disso, é importante se atentar ao modo de produção utilizado pelos autores, visto que eles não realizaram etapas que comprimiriam o material, não possibilitando a saída do ar interno e perda da característica de isolamento térmico.

6 CONCLUSÕES

A obtenção de painéis de partículas produzidos a partir de madeira com partículas industriais, resina poliuretana a base de óleo de mamona e poliestireno expandido (EPS) pós-consumo, mostrou grande potencial de aplicação para uso na construção civil como isolante, devido ao seu desempenho físico, mecânico e térmico, contribuindo para o gerenciamento destes resíduos por meio da reutilização e práticas com menor impacto ambiental.

Com base nos resultados obtidos, observou-se que:

- O padrão granulométrico das partículas de madeira de eucalipto e de EPS utilizadas para a produção de painéis estavam em concordância com a literatura a respeito do tema. As partículas finas de madeira (superficial) apresentaram seus tamanhos majoritariamente menores que 0,833 mm, enquanto as partículas grossas de madeira (camada interna) apresentaram sua distribuição granulométrica compreendida entre 0,833 mm e 1,651 mm. Por outro lado, as partículas de EPS apresentaram 92% com tamanhos das esferas compreendidas entre 1,651 mm e 3,962 mm, enquanto o material restante apresentou tamanhos menores decorrentes do processo de reciclagem;

- À estabilidade térmica dos painéis compostos madeira e EPS se mostrou bastante semelhante ao painel testemunha (somente madeira), com temperaturas de degradação e perdas de massa próximas e com dois picos de degradação. O EPS apresentou menor estabilidade, com uma degradação térmica mais acelerada e contínua. Desta forma, a produção dos painéis é uma forma viável de amenizar a queima do EPS quando utilizado em isolamento;

- As imagens de MEV possibilitaram a análise da microestrutura dos painéis e como os materiais interagem entre si. Foi possível verificar que a estrutura da resina poliuretana a base de óleo de mamona contribuiu com uma pequena camada impermeabilizante a água para as partículas de madeira, contribuindo para a redução das propriedades relacionadas a absorção de água. Foi verificado que o EPS não se fundiu, o que se esperava, pois foi possível verificar sua estrutura mais uniforme (sem poros).

- As configurações dos painéis, 12,5% e 25% de EPS disperso no núcleo, tiveram influência estatisticamente apenas nas propriedades físicas de inchamento em espessura em 2 horas e teor de umidade, sendo assim, a presença do EPS em relação à amostra testemunha apresentou superioridade no desempenho para a propriedade de inchamento em espessura neste período;

- As propriedades físicas de absorção de água e inchamento em espessura foram satisfatórias, e isso se deve principalmente a resina e ao EPS utilizados, visto que são materiais hidrofóbicos, aumentando significativamente a resistência a umidade dos painéis;

- A adição de partículas de EPS não se mostraram influentes para as propriedades mecânicas, pois as amostras foram consideradas equivalentes estatisticamente; entretanto, o desempenho dos painéis com EPS foi superior para as propriedades de MOE na flexão e de resistência a tração perpendicular, quando analisados os valores médios para estas propriedades. Maiores quantidades de EPS nos painéis poderiam resultar em aumento das propriedades mecânicas, embora pudessem reduzir a densidade dos painéis, propriedade esta que tem relação direta com o desempenho mecânico;

- A condutividade térmica não apresentou influência da adição de EPS nas amostras, em função da equivalência estatística. Contudo, as amostras com EPS apresentaram valores médios menores para esta propriedade. Este resultado pode ter ocorrido devido as condições de produção do painel, pois a pressão durante a prensagem a quente pode contribuir para achatamento e rompimentos das esferas de EPS, liberando o ar interno, e aumentando a condutividade térmica. Desta forma, torna-se oportuno pesquisas futuras que verifiquem a etapa de prensagem do painel, observando a pressão e temperatura da prensa durante o processo.

REFERÊNCIAS

ABDULKAREEM, S.A., Raji, S.A., Adeniyi, A.G., 2017. Development of particleboard from waste styro foam and sawdust. *Niger. J. Technol. Dev.* 14 (1), 18–22.

ADNAN, Tuan Mohamad Firdaus Bin Tuan Muhamad; HERMAWAN, Andi. Production of particleboard by using waste expanded polystyrene (EPS) as binder. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing LLC, 2022. p. 080013.

AKINYEMI, Banjo Ayobami et al. Durability and strength properties of particle boards from polystyrene–wood wastes. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 6, p. 1541-1549, 2019.

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

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1: Particleboard**. Gaithersburg, 2016.

ANDRADE, Hosana Aguiar Freitas de et al. Propriedades físico-mecânicas de painéis multicamadas produzidos com partículas de coco babaçu e de Pinus sp. 2017.

ANGELIN, A. F. **Análise dos Desempenhos Físicos, Mecânicos, Térmico Acústico da Microestrutura do Concreto Leve Autoadensável Emborrachado (CLAE)**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, 2018.

ARAÚJO, Cristiane Karyn de Carvalho. **Influência da geometria das partículas da camada interna nas propriedades de painéis particulados de três camadas**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/157026>.

ARAUJO, V. A.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; BIAZZON, J. C.; MORALES, E. A. M.; GARCIA, J. N. Timber housing production systems in Brazil. *Agricultural Food Engineering*, v. 13, n. 62, p. 69-80, 2020. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.6>.

ASCAM, Associação dos Catadores de Materiais Recicláveis de Bauru e Região, **Relatórios Operacionais – 2º ano de gestão**. Disponível em: <https://ascam.org.br/relatorios-operacionais-2o-ano-de-gestao/> Acesso em: 01 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABIQUIM). **Dados do mercado**. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/mercado.html>. Acesso em: 10ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS (ABRE). Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2021-2/> Acesso em: 03 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISSO 3310-1**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7402**: Carvão vegetal – Determinação granulométrica. Rio de Janeiro. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro. 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR. 14.810-1**: Painéis de partículas de média densidade - parte 1: terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11949**: Poliestireno expandido para isolamento térmica - Determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO COOPER 3R'S. **MOGI GUAÇU LIXO ZERO: indicadores da coleta seletiva solidária em Mogi Guaçu**. Indicadores da coleta seletiva solidária em Mogi Guaçu. 2022. Disponível em: <https://mogiguaculixozero.mogiopendata.com.br/> Acesso em: 09 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). **Perfil 2021**: as indústrias de transformação e reciclagem de plástico no brasil. 2022. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2021/> Acesso em: 30 set. 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (ABRAPEX). 2021. Disponível em <http://www.abrapex.com.br>. Acesso em: 03 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO INDUSTRIAL DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (ACEPE). Disponível em: <http://www.acepe.pt> . Acesso em: 03 jun. 2022

ASSOCIATION FOR EUROPEAN MANUFACTURERS OF EXPANDED POLYSTYRENE (EUMEPS). **Reaction to fire behavior – SBI testing program – mounting and fixing conditions for EPS boards**. Allanic X. 2004.

ASTM E1530-11, Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org

AYDOĞMUŞ, E. et al. Synthesis and characterization of EPS reinforced modified castor oil-based epoxy biocomposite. **Journal of Building Engineering**, v. 47, p. 103897, 2022.

BABATUNDE, T.; BABATUNDE, O.; BABATUNDE, K.; ADULOJU, A.; OLUWALANA, T.; INYANG, V. Profitability, marketing efficiency and value addition of timber industry in Ife East Local Government of Osun State, Nigeria. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 24, n. 4, p. 589-595, 2020.

BEKHTA, Pavlo et al. Selected Properties of Veneered Lightweight Particleboards with Expanded Polystyrene. **Materials**, v. 15, n. 18, p. 6474, 2022.

BERTOLINI, Marília da Silva. **Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas**. Orientador: Francisco Antonio Rocco Lahr. 2014. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-23112014-113105/publico/MariliaBertolini_Tese.pdf.

BIAZUS, André; HORA, André Barros da; LEITE, Bruno Gomes Pereira. Panorama de mercado: painéis de madeira. 2010. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1765> . Acesso em: 06 mar. 2019.

BOLLAKAYALA, Vijaya Lakshmi et al. 2022. Preparation and characterization of green composites based on expanded polystyrene waste and biomass: sustainable management approach. *Mater. Today Proc.* 66 (4), 1762–1768, 2022.

BOLLAKAYALA, Vijaya Lakshmi et al. 2023. Enhancement of wood-plastic composite properties in presence of recycled vehicular soot as a carbon source material: Sustainable management approach. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 174, p. 286-297, 2023.

BOSCHE, K. V. et al. Anisotropic polyethersulfone foam for bicycle helmet liners to reduce rotational acceleration during oblique impact. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of engineering in medicine**, v. 231, n. 9, p. 851-861, 2017.

BORUSZEWSKI, Piotr et al. Low-Density Particleboards Modified with Expanded and Unexpanded Fillers—Characteristics and Properties. **Materials**, v. 15, n. 13, p. 4430, 2022.

CALLISTER, William, D. **Materials Science and Engineering - An Introduction** (John Wiley & Sons, INC. 2003)

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering**. London: Wiley, 2011.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

CHENG, Zenghui et al. A multiple cross-linking strategy to develop an environment-friendly and water resistance wheat gluten protein wood adhesive. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 128712, 2023.

CHUNG, S. Y. et al. The influence of different concrete additions on the properties of lightweight concrete evaluated using experimental and numerical approaches. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 314–322, 2018.

Comissão Setorial do EPS. **O QUE É EPS?** 2020. Disponível em: epsbrasil.eco.br/eps/index.html#:~:text=EPS%20é%20a%20sigla%20internacional,registrada%20da%20empresa%20Knauf%20Isopor.. Acesso em: 03 jun. 2022.

CONSTRUMARKET. **Conheça as vantagens de reciclar o Poliestireno Expandido (EPS)**. 2022. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/especiais/grupoisorecort/materia/conheca-as-vantagens-de-reciclar-o-poliestireno-expandido-eps/17653>. Acesso em: 02 ago. 2022.

DANTAS, José Geraldo de Oliveira. **Análise comparativa do desempenho do concreto leve com adição de poliestireno expandido (EPS)**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado – Ciência da Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Centro de Ciências Exatas e Naturais, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/4636>.

DEUS, R. M.; BATTLSTELLE, R. A. G.; SILVA, G. H. R. **Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências**. Engenharia sanitária e ambiental, v.20, n.4, p. (685-698), out/dez 2015.

DE KEER, Lies et al. A complete understanding of the reaction kinetics for the industrial production process of expandable polystyrene. **AIChE Journal**, v. 63, n. 6, p. 2043-2059, 2017.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DIAS, F. M. (2008). Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada. ROCCO LAHR, F. A. **Produtos derivados da madeira: síntese dos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, SET-EESC-USP**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 73-92.

DREW, D.M.; DOWNES, G.M.; BATTAGLIA, M. CAMBIUM, a process-based model of daily xylem development in Eucalyptus. **Journal of Theoretical Biology**, Amsterdam, n. 264, p. 395-406, 2010.

ESPUNY, M. et al. Building new paths for responsible solid waste management. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 7, p. 1-20, 2021.

FERREIRA, O. P. Prospectiva tecnológica da cadeia produtiva madeira e móveis. São Paulo: Divisão de Produtos Florestais, 2002, p.65 (**Resumo**).

FIORELLI, J. et al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. **Industrial Crops And Products**, Amsterdam, v. 40, p.69-75, 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> Acesso em: 27 Dez. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. Joint Forest Sector Questionnaire Definitions. FAO, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/forestry/7800-0a5babc2847536d345f55cf15f77c2601.pdf> Acesso em: 16 Ago. de 2022.

FU, H.; HO, Y.; SUI, Y.; LI, Z. (2010) A bibliometric analysis of solid waste research during the period 1993-2008. **Waste Management**, v. 30, n. 12, p. 2410-2417.

GAVA, M. et al. Production of Particleboards from Hevea brasiliensis Clones and Castor Oil-based Polyurethane Resin. **Bioresources**, Raleigh, v. 10, n. 4, p. 6896-6905, 2015.

GILIO, G. C. Avaliação de painéis de partículas homogêneas empregando-se madeira de hevea brasiliensis e tectona grandis, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona. 2020. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** – UNESP.

GUIMARÃES, J. B. J. **Painéis de madeira de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências** / LAVRAS – MINAS GERAIS – BRASIL – 2008

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório 2021, Capítulo II, p. 41, 32. Brasília, 2020

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Cenários: estatística da indústria brasileira de árvores - 2º semestre de 2022. Estatística da Indústria Brasileira de Árvores - 2º semestre de 2022. 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> Acesso em: 25 ago. 2022.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2020. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A714#>>. Acesso em: 20 out. 2020.

INTAHPHUAK, S. et al. Religion role on community movement for solid waste management. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**. Philadelphia, v. 43, n.4, p. 321-327, mar. 2017.

IRLE, M. A.; BARBU, M. C.; REH, R.; BERGLAND, L.; ROWELL, R. M. WoodComposites. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2012. Cap. 10.

ISOMAF - Tecnologia em EPS. **EPS e o Meio Ambiente**. 2022. Disponível em: <https://www.isomaf.com.br/blog/8/EPS-e-o-Meio-Ambiente>. Acesso em: 02 ago. 2022.

IWAKIRI, Setsuo. **Resíduos de serraria na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto**. 2000. 6 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, UFPR, Paraná, 2000.

IWAKIRI, Setsuo. **Painéis de madeira aglomerada**. 2005. 39 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, UFPR, Paraná, 2005.

IWAKIRI, S., TRIANOSKI, R. **Painéis de Madeira Reconstituída**. 2. ed. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2020. 259 p.

Ji, M., F. Li, J. Li, J. Li, C. Zhang, K. Sun, and Z. Guo. 2021. "Enhanced Mechanical Properties, Water Resistance, Thermal Stability, and Biodegradation of the Starch-Sisal Fibre Composites with Various Fillers." **Materials & Design** 198. Doi:10.1016/j.matdes.2020.109373.

JOAQUIM, M. **Reciclagem de isopor** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por cooperativaacacia@gmail.com em 05 Ago. 2022.

KIOUPIS, D. et al. Development of Lightweight Geopolymer Composites by Combining Various CDW Streams. **Ceramics**, v. 6, n. 2, p. 837-857, 2023.

KITAI, S. A.; PIZZA, J. V. B.; MORAES, C. A. G.; BERTOLINI, M. S. Influência da proporção de poliestireno expandido na camada interna de painéis de Pinus sp. In: IV Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera, nº4, 2019, Montevideo. Anais do IV Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera - CLEM 2019, 2019.

LAKREB, Nadia et al. Production and characterization of particleboards from cork-rich Quercus cerris bark. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, p. 989-997, 2018.

LU, Jinhan et al. Design of fire resistant, sound-absorbing and thermal-insulated expandable polystyrene based lightweight particleboard composites. **Construction and Building Materials**, v. 305, p. 124773, 2021.

LUCAS, Cláudio Nelson Mateus. **Concretos leves com agregados reciclados: propriedades físico-mecânicas e térmica**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2021.

LUO, Shupin; GAO, Li; GUO, Wenjing. Effect of expanded polystyrene content and press temperature on the properties of low-density wood particleboard. **Maderas. Ciencia y tecnología**, n. AHEAD, p. 0-0, 2020

MATTELLI. **FASES DO INCÊNDIO**. 2020. Disponível em: <https://mattelli.com.br/fases-do-incendio-2/>. Acesso em: 20 jul. 2023.

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

MELO, Breno Nonato de et al. Effect of functionalizing sawdust as a reinforcement in two types of renewable polyurethane. **Polymer Bulletin**, p. 1-20, 2023.

MNGOMEZULU, Mfiso E. et al. Review on flammability of biofibres and biocomposites. **Carbohydrate polymers**, v. 111, p. 149-182, 2014.

MORAVIA, W.G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

MORESCHI, J. C. **Produtos preservantes de madeira**. 3. Ed. Curitiba: UFPR, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 176p. 2010a.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010b.

MORESCHI, João Carlos. **Propriedades da madeira**. Setor de Ciências Agrárias. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Universidade Federal do Paraná, v. 4, 2012.

MÜZEL, S. D. Madeira de Hevea brasiliensis como matéria prima para a produção de chapa de partículas aglomeradas. **Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira)** – Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2013.

O MUNICÍPIO JOINVILLE - **Economia circular: Joinville inova na reciclagem de isopor e torna-se referência nacional**. Joinville, 25 maio 2022. Disponível em: <https://omunicipiojoinville.com/economia-circular-joinville-inova-na-reciclagem-de-isopor-e-vira-referencia-nacional/#>. Acesso em: 02 ago. 2022

.

OHIJEAGBON, Idehai O. et al. Development and characterization of wood-polypropylene plastic-cement composite board. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00365, 2020.

OLIVEIRA JÚNIOR, Juvenil Nunes de et al. Ecofriendly panels for building with eucalyptus sawdust and vegetal polyurethane resin: A mechanical evaluation. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e01839, 2023.

ONU - Organização das Nações Unidas. **“Passo importante, mas não o suficiente”, afirma Guterres sobre acordo da COP26**. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2021/11/1770432>> Acesso em: 17 nov. 2021.

ONU - Organização das Nações Unidas. **COP27**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/search?key=COP27> Acesso em: 08 dez. 2022.

OSARENMWINDA, J. O.; NWACHUKWU, J. C. Effect of particle size on some properties of rice husk particleboard. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, 2007. p. 43-48.

OZÓRIO, Bianca Pereira Moreira. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. 2016. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Programa de Engenharia Civil (Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07032017-102857/pt-br.php>.

PLASTIVIDA. **PROCESSO DE RECICLAGEM DO EPS**. 2015. Disponível em: http://eps.plastivida.org.br/reciclagem_processo.> Acesso em: 08 maio 2023.

PRASITTISOPIN, Lapyote; TERMKHAJORNKIT, Pipat; KIM, Young Hoon. Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects. **Journal of Cleaner Production**, p. 132919, 2022.

PEDROSA, A. L.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. Produção de Vigas Estruturais em Perfil “I” com Painéis de Madeira Reconstituída de *Pinus taeda* L. E *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Revista Floresta*, v. 35, n. 3, p.443-449, 2005.

PEREIRA, P. I. G. **Avaliação de vigas de madeira de Castanho tendo por base a classificação visual e ensaios não destrutivos**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia Universidade do Moinho, 2015.

PIZZA, J. V. B.; MORAIS, C. A. G.; BERTOLINI, M. S. (2022a). Aplicação do conceito de upcycling para reutilização de madeira residual e EPS pós-consumo em painéis compósitos. In: Simpósio de Engenharia de Produção, n°29, 2022, Bauru. Disponível em: https://simpep.feb.unesp.br/anais_simpep.php?e=17. acesso em: 26 jul. 2023.

PIZZA, J. V. B.; RODOLPHO, B. Y. S.; MORAIS, C. A. G.; BERTOLINI, M. S. (2022b). Destinação final de EPS pós-consumo na fabricação de painéis compósitos de madeira. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, n°42, 2022, Foz do Iguaçu. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WPG_390_1935_43331.pdf. Acesso em: 26 jul. 2023.

PIZZA, J. V.B. Potencial de isolamento térmico de painéis com inclusão de poliestireno expandido pós-consumo. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2020.

PIZZA, J. V. B.; VIANA, L. L.; MORAIS, C. A. G.; BERTOLINI, M. S. (2019). Painéis com inclusão de poliestireno expandido pós-consumo: análise da configuração do painel e condições de prensagem. In: Encontro

Nacional de Engenharia de Produção, nº39, 2019, Santos. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_298_1683_38194.pdf. Acesso em: 26 jul. 2023.

RAUBER, Renata et al. **Caracterização de painéis aglomerados com madeira de eucalipto e sólidos granulares de poliuretano**. Orientador: Clóvis Roberto Haselein. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

REFRARIL. **Pérolas de Poliestireno Expandido (EPS | Isopor®)**. 2022. Disponível em: <https://www.refratil.com.br/produto/perolas-de-poliestireno-expandido-eps-isopor/>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ROCHA, Jakelyne dos Santos. **ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DE UM DEPÓSITO DE GRANDES DIMENSÕES EM SITUAÇÃO SIMULADA DE INCÊNDIO, OBTIDA ATRAVÉS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL**. 2020. 31 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Segurança Contra Incêndios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2020.

RODOLPHO, B. Y. S.; PIZZA, J. V. B.; MORAIS, C. A. G.; BERTOLINI, M. S. (2022). Análise da viabilidade técnica da utilização do EPS pós-consumo na produção de painéis de partículas. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, nº42, 2022, Foz do Iguaçu. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_ST_390_1935_43284.pdf. Acesso em: 26 jul. 2023.

RODRIGUES, Felipe Reis. Estudo da viabilidade do uso de resíduo de poliestireno e poliuretano de óleo de mamona na produção de painéis aglomerados homogêneos de pinus e eucalipto. 2022.

ROSE, Colin M.; STEGEMANN, Julia A. From waste management to component management in the construction industry. **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 229, 2018.

SANTOS, Alana. **Fases do fogo | Veja seu processo de desenvolvimento**. 2021. Disponível em: <https://storesolutions.com.br/alarme-de-incendio/fases-do-fogo-veja-seu-processo-de-desenvolvimento/>. Acesso em: 28 jul. 2023.

SBI – Stalbyggnadsintituted, The Swedish Institute of Steel Construction. **Sustainability of steel framed building**. 2017. Acesso em: 02 abr. 2021.

SCHMIDT, P. N. S. et al. Flexural test on recycled polystyrene. *Procedia Engineering*, v. 10, p. 930-935, 2011.

SCOPUS. Elsevier, 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>. Acesso em: 19 Dez. 2023.

SHI, J. et al. Optimizing the Composition Design of Cement-Based Expanded-Polystyrene (EPS) Exterior Wall Based on Thermal Insulation and Flame Retardance. **Polymers**, v. 14, n. 23, p. 5229, 2022.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio:conforme ABNT NBR 15200:2012**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

SIMPSON, A. et al. Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams. **Cellular Polymers**, v. 39, n. 6, p. 238-262, 2020.

SINDICATO DA INDUSTRIA DE MATERIAL PLÁSTICO, TRANSFORMAÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAL PLÁSTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SINDIPLAST. **Dados do setor: a indústria do plástico no estado de São Paulo**. 2022. Disponível em: <http://www.sindioplast.org.br/dados-do-setor/>. Acesso em: 12 out. 2022.

SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais. **Boletim SNIF 2019**. ed. 1. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2019.

SOUZA, A. M. et al. Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. **Journal of Cleaner Production**, London, v. 193, p. 549-562, 2018.

SUGAHARA, Estefani Suana. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. Orientador: Sergio Augusto Mello da Silva. 2018. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEIS), Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/157141>.

TREVISAN, Mariana Ferreira. **Painéis aglomerados homogêneos produzidos com partículas de pinus e seringueira e aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona: avaliação das propriedades físicas e mecânicas**. 2021. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2021.

TSAI, Kuang-Chung. Influence of substrate on fire performance of wall lining materials. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3258-3263, 2009.

UFSC – Materioteca Sustentável. **Madeira de reflorestamento**. 2022. Disponível em: <https://materioteca.paginas.ufsc.br/madeira-de-reflorestamento/>. Acesso em: 01 fev. 2023

VASCONCELLOS, Matheus Soares; DE OLIVEIRA, Edenis Cesar. Gerenciamento de Resíduos Sólidos Madeireiros: Estudo em Empresas Madeireiras no Município de Buri–SP. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 78118-78146, 2020.

WECHSLER-PIZARRO, Andrea; NÚÑEZ-DECAP, Mario. Preliminary study of particleboards manufactured with pine cones and Eucalyptus globulus capsules with a bio-based polyurethane adhesive. **Polymer Composites**, v. 43, n. 11, p. 8239-8249, 2022.

YANG, L.; CHEN, Z.; LIU, T.; GONG, Z.; YU, Y.; WANG, J. (2013a) Global trends of solid waste research from 1997 to 2011 by using bibliometric analysis. *Scientometrics*, v. 96, n. 1, p. 133-146.

YANG, L.; CHEN, Z.; LIU, T.; WAN, R.; WANG, J.; XIE, W. (2013b) Research output analysis of municipal solid waste: a case study of China. *Scientometrics*, v. 96, n. 2, p. 641-650.

YANO, Bruna Bessa Rocha; SILVA, Sérgio Augusto Mello da. Produção e avaliação físico-mecânica de painéis de média e alta densidade com resíduos. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 329-345, 2020.

YU, Baogang et al. Fire hazard evaluation of thermoplastics based on analytic hierarchy process (AHP) method. **Fire and materials**, v. 34, n. 5, p. 251-260, 2010.

ZAU, Mírian Dayse Lima et al. Avaliação das propriedades química, física e mecânica de painéis aglomerados produzidos com resíduo de madeira da Amazônia-Cumaru (*Dipteryx Odorata*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Polímeros**, v. 24, p. 726-732, 2014.

ZHONG, Zheng et al. Long-term effect of plastic feeding on growth and transcriptomic response of mealworms (*Tenebrio molitor* L.). **Chemosphere**, v. 287, p. 132063, 2022.

ZHOU, Keqing; GUI, Zhou; HU, Yuan. The influence of graphene based smoke suppression agents on reduced fire hazards of polystyrene composites. Composites Part A: **Applied Science and Manufacturing**, v. 80, p. 217-227, 2016.