

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

RODRIGO ANDRAUS BISPO

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE FIBRA DE COCO,
PÍNUS E EUCALIPTO AGLUTINADAS COM ADESIVO POLIURETANO
DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA**

Ilha Solteira
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO ANDRAUS BISPO

PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE FIBRA DE COCO, PÍNUS E EUCALIPTO AGLUTINADAS COM ADESIVO POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Especialidade: Estruturas

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva
Orientador

Prof. Dr. Adriano Souza
Co-orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B622p Bispo, Rodrigo Andraus.
Produção e avaliação de painéis de partículas de fibra de coco, pínus e eucalipto aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona / Rodrigo Andraus Bispo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
124 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2021

Orientador: Sérgio Augusto Mello da Silva

Coorientador: Adriano Souza

Inclui bibliografia

1. Painel de partículas. 2. Cocos nucifera. 3. Resina poliuretana à base de óleo de mamona. 4. Propriedades físico-mecânicas.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE FIBRA DE COCO, PINUS E EUCALIPTO AGLUTINADAS COM ADESIVO POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA

AUTOR: RODRIGO ANDRAUS BISPO

ORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

COORIENTADOR: ADRIANO SOUZA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ALEX OTÁVIO SANCHES (Participação Virtual)
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Ilha Solteira, 24 de agosto de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Benevides Bispo Neto e
Miriam Brandão Andraus Bispo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus na trindade divina

A Nossa Senhora Auxiliadora pela companhia

Aos meus pais Benevides Bispo Neto e Miriam Brandão Andraus Bispo

Ao meu irmão Guilherme Andraus Bispo pelo exemplo

A minha namorada Aryane KameTamanaha pelo incentivo

Aos meus amigos Gabriel Esgalha e João Lucas Coelho Tardivel por me receberem em Ilha Solteira e a todos os amigos que fiz neste período da minha vida

Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello e ao meu co-orientador Prof. Dr. Adriano Souza

Ao meu supervisor de estágio docência Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcantara.

Aos professores Dr. Jorge Luís Akasaki, Dr. Alex Otávio Sanches e Dr. André Luis Christoforo por aceitarem integrar a banca examinadora no Exame Geral de Qualificação e na Defesa e a todos os professores desta renomada instituição, em especial aos que tive o prazer de ser aluno nas disciplinas por eles ministradas no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da FEIS – UNESP.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira FEIS que me acolheu e presenteou com a oportunidade de ministrar as disciplinas de Estruturas de Madeira e Construção de Pontes, ao lado do Prof. Dr. Sérgio Augusto, ao curso de graduação de Engenharia Civil.

Ao grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção – MAC, do qual tenho o prazer de humildemente fazer parte.

Também ao Departamento de Engenharia Civil – DEC e a todos os seus servidores.

A Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE da FEIS – UNESP, nestes agradecimentos, representada pelo servidor Alvino da Silva.

A Seção de Manutenção e Conservação – Diretoria de Serviços da FEIS – UNESP aqui representada pelo senhor Luiz Doniseti Belezze, servidor da Marcenaria.

Ao Laboratório de Engenharia Civil localizado no Campus Central da FEIS – UNESP e a todos os seus servidores técnicos.

À empresa Nitran Sais Produtos para Jardinagem e Horticultura, localizada na cidade de Potirendaba – SP pela doação da fibra de coco.

À empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda. pela doação da resina PU-Mamona.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

“À ÁRVORE

Consola que entre os homens, maus, pedantes,
viceje da Árvore a bondade inata.
Toda em flores e frutos se desata,
na glória dos seus galhos verdejantes.

Não frutifica? – Abriga os viandantes
que aí vêm sob um sol que quase mata.
No inverno, é lume. A Árvore é uma oblata
de luz e pão aos homens, maus, pedantes.

A Árvore é sacrifício e caridade...
Vós que viveis na guerra e na impiedade,
vede o exemplo da santa da floresta:

embalou-vos no berço. E ainda é ela
quem, no cipreste, desolada e mesta,
o vosso orgulho apodrecido vela.”

RESUMO

A alta demanda da construção civil e indústria moveleira por painéis de madeira reconstituída aponta para um vasto campo a ser explorado. O emprego de materiais lignocelulósicos de diferentes origens em painéis de partículas, depende de estudos para viabilizar a produção e, conseqüentemente, melhorar a qualidade e propriedades do produto. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência das misturas de fibra de coco (*Cocos nucifera*) e partículas de madeira de pínus (*Pinus taeda* L.) e eucalipto (*Eucalyptus saligna*) nas propriedades de painéis de partículas. O teste de contraste de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para verificar a influência das composições entre partículas, sendo essas de 100% de fibra de coco (F100 P0 E0), 50% de fibra de coco, 25% de partículas de pínus e 25% de partículas de eucalipto (F50 025 E25) e 50% de partículas de pínus e 50% de partículas de eucalipto (F0 P50 E50), com teor de umidade das partículas entre 0 e 2% e 10%, em massa, de resina poliuretana derivada de óleo de mamona (PU-Mamona). Foram produzidos 3 painéis para cada mistura proposta e avaliadas as propriedades físico-mecânicas de acordo com os requisitos exigidos pela ABNT (2013; 2018) e ANSI (1999). Os resultados obtidos indicaram potencialidade de utilização de fibra de coco para produção de painéis de partículas homogêneos frente aos critérios mínimos exigidos pelos documentos normativos, com destaque à propriedade física de inchamento após 24 horas que apresentou média estatisticamente equivalente à composição que continha apenas partículas de madeira.

Palavras-chave: painel de partículas; *cocos nucifera*; resina poliuretana à base de óleo de mamona; propriedades físico-mecânicas.

ABSTRACT

The high demand of the construction and furniture industry for reconstituted wood panels points to a vast field to be explored. The use of lignocellulosic materials from different origins in particleboards, depends on the research to make production feasible and, consequently, to improve the quality and properties of the product. The objective of this research was evaluate the influence of mixtures of coconut fiber (*Cocos nucifera*) and wood particles from pine (*Pinus taeda* L.) and eucalyptus (*Eucalyptus saligna*) on the properties of particleboards though a exploratory study. The Turkey mean contrast test, at the 5% level of significance, was used to verify the influence of the compositions between particles: 100% coconut fiber (F100 P0 E0), 50% coconut fiber, 25% pine particles and 25% eucalyptus particles (F50 P25 E25) and 50% pine particles and 50% eucalyptus particle (F0 P50 E50), with moisture contente between 0 and 2% and 10% by mass of castor oil-based polyurethane adhesive (PU-Castor). Three panels were produced for each proposed mixture and evaluated the physical and mechanical properties according to the requirements demande by ABNT (2013; 2018) and ANSI (1999). The results obtained indicated potential use of coconut fiber for the production of homogeneous particleboards against the minimum criteria required by the normative documents, with emphasis on the physical propertie of thickness swelling, which obtained a avarage statistically equivalent to the treatment that contained only wood particles.

Keywords: particleboard; *cocos nucifera*; castor oil-based polyurethane adhesive; physical-mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição florestal brasileira por estado e por gênero cultivado	24
Figura 2 - Evolução da quantidade (m ³) de madeira extraída, por tipo de floresta....	25
Figura 3 - Máscara do desmatamento de florestas nativas no bioma Amazônia	26
Figura 4 - Número de publicações anuais ligadas à palavra-chave <i>particleboard</i> via base de dados <i>SpringerLink</i>	27
Figura 5 - Esquema de distribuição de partículas por classe de painéis de partículas.	28
Figura 6 - Principais produtores mundiais de painéis reconstituídos.....	30
Figura 7 - Distribuição de unidades industriais produtoras de painéis de madeira reconstituída no território nacional por tipo de produção.....	31
Figura 8 - Delimitação do sistema de produção de painéis de partículas.	32
Figura 9 - Fluxograma contendo o processo de produção de MDP.	33
Figura 10 - Capacidade de produção de MDP no Brasil.	34
Figura 11 - Descarte de casca de coco no meio ambiente.	43
Figura 12 - Distribuição de florestas plantadas de pinus por estado brasileiro.	45
Figura 13 - Evolução da área plantada de pinus no território brasileiro por estado. .	45
Figura 14 - Volume (m ³) de madeira de reflorestamento de pinus por segmentos de destino no Brasil.....	46
Figura 15 - Distribuição de florestas plantadas de eucalipto por estado brasileiro....	48
Figura 16 - Volume (m ³) de madeira de reflorestamento de eucalipto por segmentos de destino no Brasil.....	49
Figura 17 - Evolução da área plantada de eucalipto no território brasileiro por estado.	50
Figura 18 - Mamona em floração	52
Figura 19 – Relações lineares entre o teor de fibra de coco e: (a) Módulo de ruptura; (b) Módulo de elasticidade; (c) Adesão interna; (d) Inchamento em espessura após 24 horas.	55
Figura 20 - Valores médios de absorção de água em painéis do tipo MDP com partículas de pinus e de casca de coco.	57
Figura 21 - Fibra de coco doada.	62
Figura 22 - Local de coleta da fibra de coco.....	63
Figura 23 - Fibra de coco em processo inicial de secagem.	63

Figura 24 - Armazenamento da fibra de coco.	64
Figura 25 - Moinho de facas.....	64
Figura 26 - Malha metálica.	65
Figura 27 - Resultado do processamento da fibra de coco.	65
Figura 28 - Plaina Desengrossadeira.	66
Figura 29 - Cavacos de madeira.	67
Figura 30 - Moagem dos cavacos de madeira em moinho de facas para produção de partículas.....	67
Figura 31 - Conjunto de peneiras e agitador utilizado para separação prévia das partículas.....	69
Figura 32 - Amostras utilizadas para ensaio de teor de umidade.....	70
Figura 33 – Picnômetro, termômetro e álcool absoluto utilizados para determinação da massa específica das partículas.	71
Figura 34 - Precipitação das partículas em álcool absoluto.	72
Figura 35 - Calibração do picnômetro ao álcool absoluto.	73
Figura 36 - Aferição da temperatura de M1.....	74
Figura 37 - Conjunto e agitador de peneiras, utilizados no ensaio granulométrico. ..	77
Figura 38- Exemplo de quarteamento de partículas.....	77
Figura 39 - Procedimento: obtenção das 35 gramas de partículas.	78
Figura 40 - Amostras utilizadas para determinação do teor de umidade das composições propostas na Tabela 5.....	78
Figura 41 - Adição e homogeneização da PU-Mamona.....	80
Figura 42 - Preparação do colchão de partículas com misturas propostas (Tabela 5) para produção dos painéis.	81
Figura 43 – Colchão de partículas previamente compactado a frio ilustrando dois tipos de misturas.	82
Figura 44 - Conjunto formadora de colchão de partículas depositado na presa hidráulica com controle de temperatura e pressão.....	82
Figura 45 - Remoção do filme plástico das superfícies do painel.....	83
Figura 46 - Esquema do ciclo de prensagem.	84
Figura 47 - Corpo de prova utilizado para realização do ensaio de densidade.	85
Figura 48 - Aferição das dimensões dos CP's.....	86
Figura 49 - Aferição da massa seca de um CP.	88
Figura 50 - Corpos de prova dispostos sob malha metálica.....	89

Figura 51 – Corpos de prova utilizados para realização dos ensaios de MOR e MOE da composição F100 P0 E0.	90
Figura 52 - Aferição das dimensões dos CP's.....	90
Figura 53 - Corpo de prova da composição F100 P0 E0 em ensaio de flexão.	91
Figura 54 - Lixadeira empregada na regularização das superfícies dos CP's.....	93
Figura 55 – Preparação do conjunto CP's e suportes metálicos para realização do ensaio de Tração Perpendicular.....	93
Figura 56 – Aspectos gerais da realização do ensaio de Tração Perpendicular	94
Figura 57 - Curva granulométrica das composições de partículas propostas.	101
Figura 58 - Densidade média das composições estudadas	102
Figura 59 - Aspectos gerais de CP's utilizados para aferição da densidade dos painéis e suas respectivas composições.	103
Figura 60 - Teor de umidade dos painéis das composições estudadas.....	104
Figura 61 - Aspectos gerais dos painéis produzidos com 100% de fibra de coco...105	
Figura 62 - Inchamento em espessura após 24 horas das composições estudadas	108
Figura 63 - Corpos de prova de painéis referentes à composição F100 P0 E0.	109
Figura 64 - Visão geral das propriedades físico-mecânicas dos painéis produzidos.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características quantitativas relacionadas à produção por variedade de coqueiro.....	42
Tabela 2 - Nomenclatura e valores médios de massa específica aparente de madeiras de reflorestamento do gênero <i>Pinus</i>	44
Tabela 3 - Nomenclatura e valores médios de massa específica aparente de madeiras de reflorestamento do gênero <i>Eucalyptus</i>	47
Tabela 4 - Conjunto de peneiras empregadas para separação das partículas.	68
Tabela 5 – Proporção de partículas, resina e teor de umidade para a produção de painéis de partículas.	75
Tabela 6 - Conjunto de peneiras empregadas no ensaio para determinação da composição granulométrica das misturas de partículas.	76
Tabela 7 - Teor de umidade da fibra de coco e das partículas de pinus e eucalipto.	97
Tabela 8 - Massa específica da fibra de coco, das partículas de pinus e eucalipto e das composições propostas.....	98
Tabela 9 - Ensaio granulométrico da composição F100P0 E0.....	99
Tabela 10 - Ensaio granulométrico da composição F50 P25 E25.....	99
Tabela 11 - Ensaio granulométrico da composição F0P50 E50.....	100
Tabela 12- Densidade média das composições.....	101
Tabela 13- Razão de compactação das composições estudadas.....	103
Tabela 14 - Teor de Umidade dos painéis	104
Tabela 15 - Inchamento em espessura máximo por finalidade de uso.	106
Tabela 16– Inchamento em espessura médio após 24 horas e absorção de água.	106
Tabela 17 - Módulo de resistência à flexão estática mínima por finalidade de uso.	109
Tabela 18 - Valores médios determinados para MOR e sua classificação	110
Tabela 19 - Módulo de Elasticidade mínimo por finalidade de uso.	111
Tabela 20 - Valores médios determinados para MOE e sua classificação.....	111
Tabela 21 - Resistência à tração perpendicular mínima por finalidade de uso.	113
Tabela 22 - Valores médios determinados para TP e sua classificação	113
Tabela 23 - Características químicas da fibra de coco e madeira de pinus e eucalipto	114
Tabela 24 - Resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados	115

Tabela 25 - Resultados do teste de contraste de médias de Tukey para os painéis avaliados das três composições.....	116
Tabela 26 - Resultados do teste de contraste de médias de Tukey considerando os teores de fibra de coco e de madeiras de pínus e de eucalipto	116

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Corpo de Prova
E	Eucalipto
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMIC	Equipamentos e Sistemas de Ensaios Ltda.
F	Fibra de coco
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
FEPE	Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão
HB	Hardboard
HD	High Density
HDF	High Density Fibreboard
I	Inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água
IBÁ	Indústria Brasileira da Árvore
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Intervalo de Confiança
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	International Standards Organization
LD	Low Density
M	Medium Density
MDF	Medium Density Fibreboard
MDP	Medium Density Particleboard
NBR	Norma Brasileira
NEPAE	Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural
NM	Norma Mercosul
P	Pínus

PF	Phenol Formaldehyde
PIB	Produto Interno Bruto
PRODES	Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite
PU	Poliuretana
SINDCOCO	Sindicato Nacional dos Produtores de Coco do Brasil
SNIF	Sistema Nacional de Informações Florestais
UF	Uréia Formaldeído - Urea Formaldehyde
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Largura do corpo de prova (mm);
CV	Coeficiente de variação (%);
D	Densidade (kg/m^3);
D_{cp}	Densidade do corpo de prova (kg/m^3);
D_p	Densidade nominal do painel (g/cm^3);
D_a	Distância entre os apoios do aparelho (mm);
$D\%$	Variação percentual da densidade;
$D_{média}$	Densidade média das composições (kg/m^3);
E	Espessura do corpo de prova (mm);
E_0	Espessura do corpo de prova antes da imersão (mm);
E_1	Espessura do corpo de prova após o período de 24 horas de imersão (mm);
I	Inchamento em espessura do corpo de prova (%);
M_p	Massa de partículas (g);
M_{cp}	Massa do corpo de prova (g);
M_1	Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto + partículas submersas) (g);
M_2	Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto) (g);
M_{An}	Massa de água necessária para atingir o teor de umidade desejado (g);
MOE	Módulo de elasticidade (N/mm^2);
MOR	Módulo de resistência à flexão estática (N/mm^2);
MP_i	Massa das partículas no teor de umidade inicial (g);
M_s	Massa seca das partículas (g);
M_u	Massa úmida das partículas (g);
P	Carga de ruptura (N);
P_1	Carga no limite proporcional, lida no indicador de cargas (N);
S	Área da superfície do corpo de prova (mm^2);
TP	Resistência à tração perpendicular (N/mm^2);
U	Teor de umidade das partículas (%);
U_d	Teor de umidade desejado das partículas (%);

U_i	Teor de umidade inicial das partículas (%);
V_{cp}	Volume do corpo de prova (mm ³);
V_p	Volume final do painel (cm ³);
$b_1e b_2$	Dimensões das arestas dos corpos de prova (mm);
d	Deflexão correspondente à carga P1 (mm);
e	Espessura do corpo de prova (mm);
ρ_s	Massa específica das partículas (g/cm ³);
ρ_w	Massa específica do álcool absoluto (g/cm ³);
$\rho_{ap}(12\%)$	Massa específica aparente da peça maciça de madeira a 12% de umidade (kg/m ³);
$\pm$	Mais ou menos;
%	Percentual;
°C	Graus Célsius;
"	Polegadas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo Geral.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos.....	22
2. REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 PANORAMA DO SETOR FLORESTAL BRASILEIRO.....	24
2.2 PAINÉIS DE PARTÍCULAS - <i>PARTICLEBOARDS</i>	26
2.2.1 Definição.....	27
2.2.2 Histórico.....	29
2.2.3 Desempenho econômico e industrial.....	29
2.2.4 Fabricação.....	32
2.2.5 Características gerais.....	34
2.2.6 Classificação.....	36
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DOS PAINÉIS	36
2.3.1 Teor de umidade das partículas.....	37
2.3.2 Densidade das partículas	38
2.3.3 Geometria das partículas.....	39
2.4 PARTÍCULAS.....	40
2.4.1 Fibra de Coco	40
2.4.2 Pínus.....	43
2.4.3 Eucalipto	46
2.5 ADESIVO	50
2.5.1 Resina poliuretana (PU).....	51
2.5.2 Resina poliuretana bi componente PU-Mamona	51

2.6 PAINÉIS DE PARTÍCULAS À BASE DE FIBRA DE COCO	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS.....	62
3.1.1 Obtenção da fibra de coco (<i>Cocos nucifera</i>).....	62
3.1.2 Processamento da fibra de coco	63
3.1.3 Obtenção das madeiras de pinus e eucalipto	66
3.1.4 Produção de partículas de pinus e eucalipto	66
3.1.5 Peneiramento prévio para separação das partículas.....	68
3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS.....	69
3.2.1 Teor de umidade das partículas.....	69
3.2.2 Massa específica das partículas	70
3.3 COMPOSIÇÕES ESTUDADAS	74
3.3.1 Determinação da composição granulométrica das misturas.....	76
3.3.2 Correção da umidade das partículas das composições.....	78
3.4 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE PARTÍCULA HOMOGÊNEOS	79
3.4.1 Cálculo da massa das partículas	79
3.4.2 Adição do adesivo às partículas e homogeneização	79
3.4.3 Preparação do colchão de partículas.....	81
3.4.4 Prensagem com controle de temperatura.....	82
3.4.5 Preparação dos corpos de prova.....	84
3.5 ENSAIOS FÍSICOS	85
3.5.1 Densidade (D).....	85
3.5.2 Teor de umidade (U).....	87
3.5.3 Inchamento após 24 horas (I)	88
3.6 ENSAIOS MECÂNICOS	89
3.6.1 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR).....	91
3.6.2 Módulo de Elasticidade (MOE)	92

3.6.3 Resistência à Tração Perpendicular (TP)	92
3.7 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS	95
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
4.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS.....	96
4.1.1 Teor de umidade das partículas.....	96
4.1.2 Massa específica das partículas	97
4.1.3 Determinação granulométrica	98
4.2 ENSAIOS FÍSICOS.....	101
4.2.1 Densidade (D).....	101
4.3.2 Teor de Umidade (U)	103
4.3.3 Inchamento (I) e Absorção (A) após 24 horas.	105
4.4 ENSAIOS MECÂNICOS	109
4.4.1 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR).....	109
4.4.2 Módulo de Elasticidade (MOE)	111
4.4.3 Resistência à Tração Perpendicular (TP)	112
4.5 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS	115
5 CONCLUSÕES	118
6 PROPOSTA PARA PRÓXIMOS ESTUDOS	119
REFERÊNCIAS.....	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Destacando-se como um dos principais insumos da construção civil, a madeira é amplamente utilizada em elementos estruturais, bem como, designada para outros fins, como no emprego em esquadrias, batentes, revestimentos e forros. Análoga à construção civil, a indústria moveleira se destaca como grande consumidora de madeira e produtos derivados.

Frente à elevada demanda de diferentes matérias-primas e técnicas produtivas, a madeira é objeto de diversas pesquisas científicas com o intuito de minorar seu desperdício, maximizando seu aproveitamento e contribuindo para a melhoria da qualidade e propriedades das peças produzidas.

Destaca-se o emprego de material particulado para a produção de painéis, com potencialidade para substituição da madeira maciça. A aglomeração de pequenos fragmentos de madeira como cavacos, aparas, maravalhas, virutas e flocos, com emprego de um ligante de origem mineral ou resina sintética, para fabricação de chapas é denominada de madeira aglomerada (BAUER, 2019).

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2013; 2018) é responsável por definir, estabelecer métodos avaliativos e delimitar parâmetros para classificação de painéis de partículas de média densidade. O *American National Standards Institute* – ANSI (1999) desempenha função análoga, em cenário internacional.

Sob o ponto de vista industrial, são utilizadas essencialmente para a produção de painéis, madeira de reflorestamento dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Contudo, vários materiais lignocelulósicos surgem como alternativa de substituição de espécies arbóreas para a produção de painéis de partículas (OLIVEIRA, *et al.* 2017).

Dentre estes materiais, as fibras naturais residuais de casca de coco, encontradas em abundância no Brasil, podem ser empregadas no processo produtivo de painéis de partículas, apresentando resultados promissores quanto às características físico-mecânicas das placas produzidas (FIORELLI, 2019).

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação, apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS – UNESP foi estruturada em seis capítulos, descritos a seguir:

O primeiro capítulo constitui-se da introdução e objetivos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão de literatura que descreve o atual cenário brasileiro, no que tange o tema estudado e o estado da arte através de pesquisas científicas nacionais e internacionais correlatas.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais utilizados e a metodologia empregada na realização desta pesquisa.

O quarto capítulo apresenta os resultados deste estudo e discussões pertinentes de acordo com as prescrições dos documentos normativos e bibliografia técnico-científica.

No quinto capítulo estão descritas as conclusões e no sexto as propostas para trabalhos futuros

Por fim, são elencadas as referências bibliográficas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho propõe produzir e avaliar painéis homogêneos de partículas com base nos documentos normativos NBR14810-1 e 2 (2013 e 2018, respectivamente) e ANSI (1999) para produção de painéis do tipo MDP (*Medium Density Particleboard*) empregando adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona (PU-Mamona) em composições com fibra de coco (*Cocos nucifera*), partículas de madeira de pínus (*Pinus taeda L.*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*).

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Produzir painéis de partículas homogêneos utilizando os documentos normativos ABNT (2013; 2018) e ANSI (1999) com misturas diferentes de fibra de coco em relação às partículas de madeira de pínus e eucalipto, com teor de umidade das partículas dentro do intervalo de 0 a 2% e

emprego de 10%, em massa seca, de resina poliuretana à base de óleo de mamona.

- b) Classificar os painéis quanto ao uso, por meio de seu comportamento físico-mecânico com base na ABNT (2013; 2018) e ANSI (1999);
- c) Verificar a influência da variação do teor de fibra de coco em relação às partículas de madeira de pinus e eucalipto no comportamento final dos painéis.

2. REVISÃO DE LITERATURA

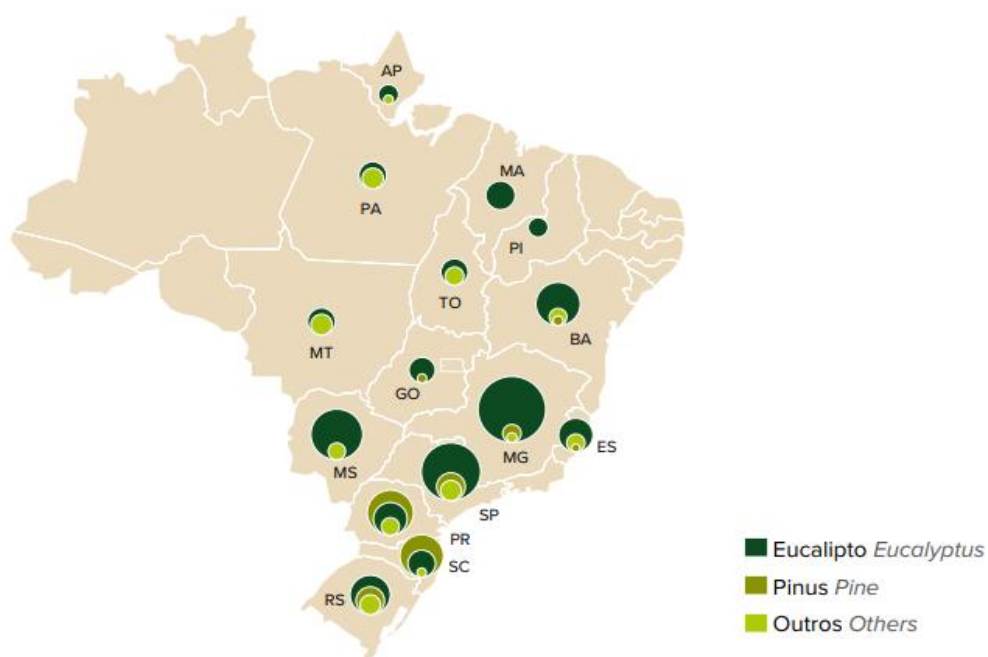
2.1 PANORAMA DO SETOR FLORESTAL BRASILEIRO

Cerca de 58,5% do território nacional corresponde a área de florestas, cobrindo uma extensão de 497.962.509 hectares. Desse total, 98% equivalem a florestas naturais, também denominadas nativas, enquanto apenas 2% correspondem a florestas plantadas, de acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF (2019).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2018) estima-se que para o ano de 2018 no território brasileiro houvesse cerca de 9,9 milhões de hectares de florestas plantadas, destes, 7,5 milhões de hectares (76,2%) corresponderem às florestas de eucalipto e 2,0 milhões de hectares (20,1%) de pinus, enquanto o montante das outras espécies totalizou, apenas, 368 mil hectares (3,7%).

Em relação ao ano de 2017 houve um aumento de 131,8 mil hectares na área total de florestas plantadas o que corresponde a um incremento de 1,3% (SNIF, 2019). A Figura 1 a seguir apresenta a distribuição de florestas plantadas no Brasil de acordo com levantamento da Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2019).

Figura 1 - Distribuição florestal brasileira por estado e por gênero cultivado

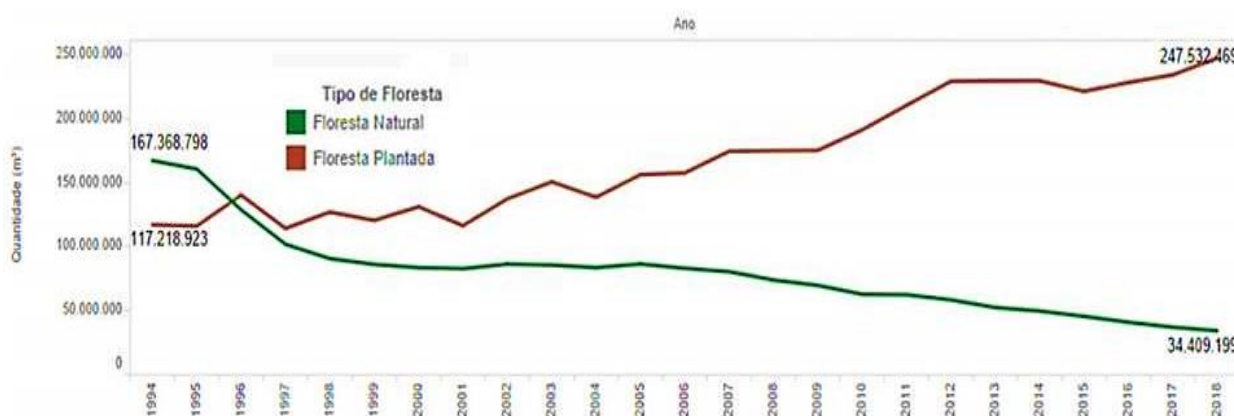


Fonte: IBÁ (2019)

A distribuição, no território nacional, de florestas plantadas não é homogênea, sendo concentrada nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. As florestas plantadas de eucalipto, predominantes em relação aos outros gêneros, ocorrem essencialmente nos estados de Minas Gerais (22%), São Paulo (16%), Mato Grosso do Sul (13%) e Paraná (11%). Já os plantios de pinus são predominantes nos estados do Paraná (44%), Santa Catarina (26%), Rio Grande do Sul (17%) e São Paulo (9%) (IBÁ, 2020).

A quantidade de madeira extraída de florestas plantadas vem aumentando com o passar dos anos, ao passo que a metragem cúbica extraída de florestas naturais diminuiu no mesmo período (Figura 2). Práticas de controle na exploração de florestas naturais contribuem para a diminuição da extração ilegal de madeira (SNIF, 2019).

Figura 2 - Evolução da quantidade (m³) de madeira extraída, por tipo de floresta.



Fonte: SNIF (2019)

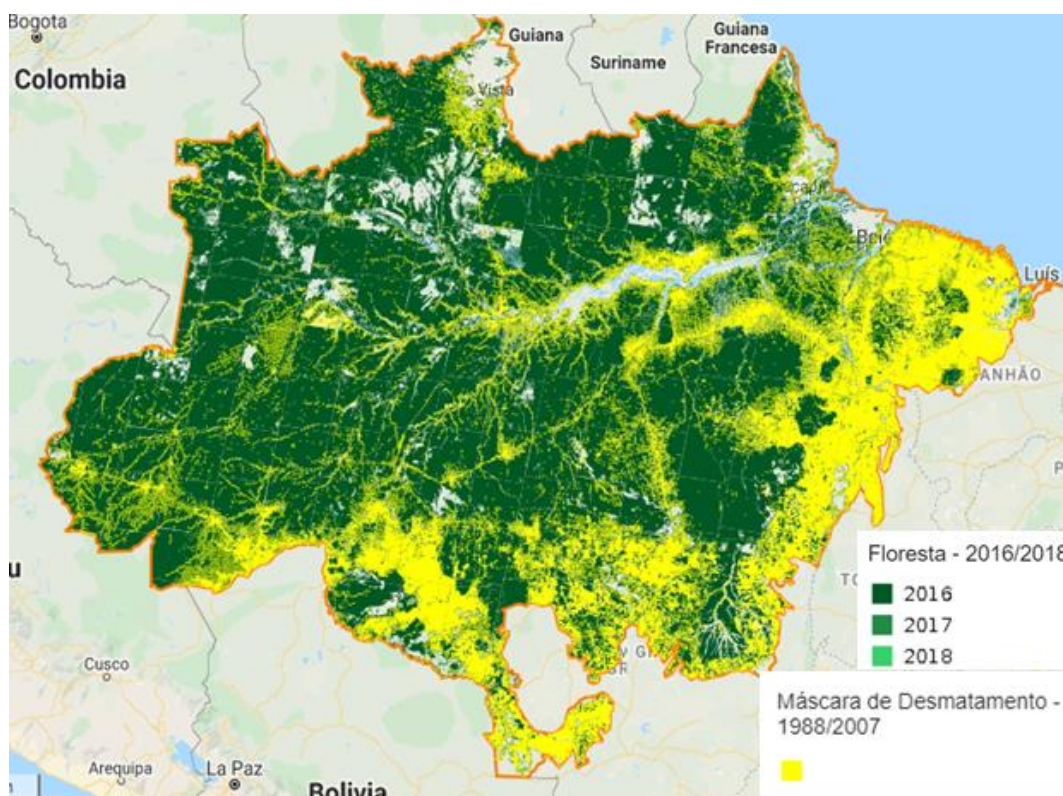
Por outro lado, de acordo com a mais recente publicação do Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra no Brasil (IBGE, 2020), houve uma perda de 7,6% da vegetação florestal nativa em um período de 18 anos. A área total no ano 2000 correspondia a 4.017.505 km² chegando à marca de 3.712.058 km² no ano de 2018.

A cobertura vegetal nacional nativa sofreu drástica redução em detrimento de novas áreas agrícolas e de pastagem. Para o mesmo período (entre 2000 a 2018), observou-se uma expansão de 27% nas áreas destinadas a pastagens concentradas principalmente às margens do bioma amazônico e 45% nas áreas destinadas à produção agrícola com destaque para a região nordeste do estado do

Mato Grosso, e para as cidades paraenses de Santarém e Paragominas e sul mato-grossenses de Campo Grande e Cassilândia (IBGE, 2020).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2020) através do Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite – PRODES acompanha o desmatamento amazônico e associa através de imagens interativas diversos índices. A Figura 3 a seguir apresenta os mais recentes levantamentos disponíveis da cobertura vegetal nativa, apenas no bioma Amazônia, em contraponto ao avanço das áreas desmatadas desde o ano de 1988.

Figura 3 - Máscara do desmatamento de florestas nativas no bioma Amazônia



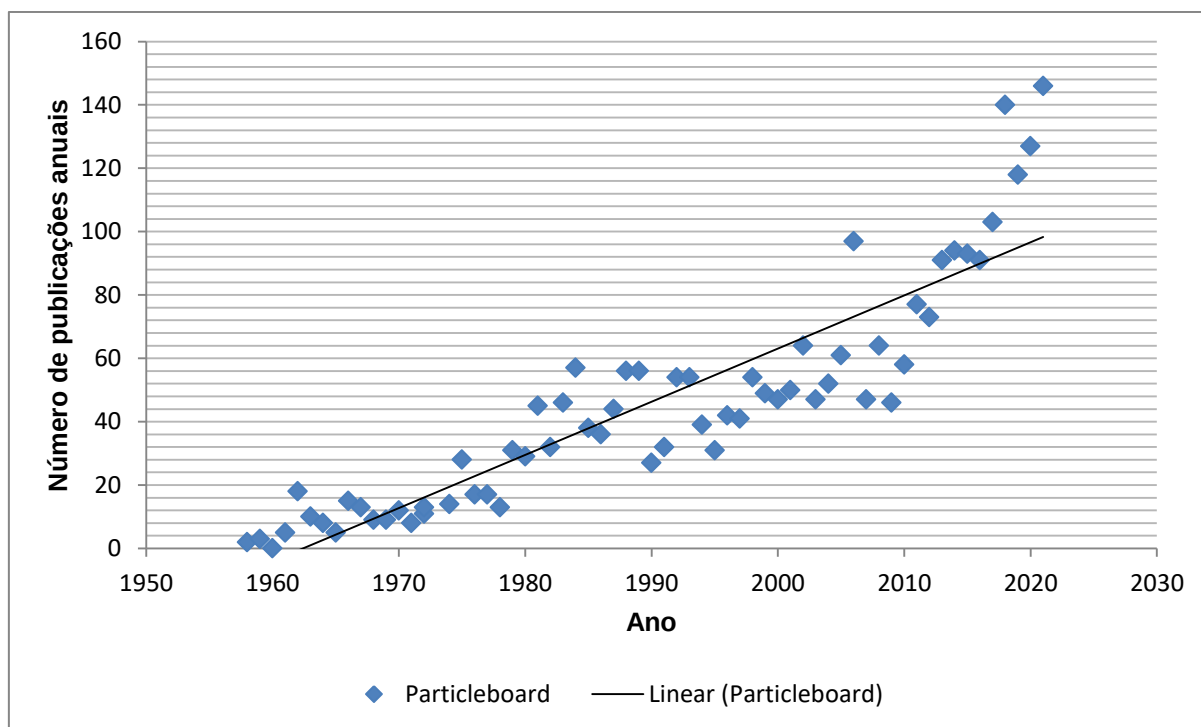
Fonte: Adaptado de INPE (2020)

2.2 PAINÉIS DE PARTÍCULAS - *PARTICLEBOARDS*

Várias pesquisas científicas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos sobre painéis de partículas. A Figura 4 demonstra a tendência crescente no número de publicações anuais, ligadas à palavra-chave *particleboard*, obtidas através de levantamento realizado na base de dados *SpringerLink*.

O levantamento de dados se deu no curso do ano de 2021, apresentando, portanto, valores parciais para esta data. O ano base do levantamento foi de 1958.

Figura 4 - Número de publicações anuais ligadas à palavra-chave *particleboard* via base de dados *SpringerLink*.



Fonte: Elaboração do próprio autor

2.2.1 Definição

De acordo com a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (2019) painéis de partículas são definidos por painéis fabricados com pequenos pedaços de madeira ou outros materiais lignocelulósicos unidos pelo uso de um aglutinante orgânico junto com um ou mais dos seguintes agentes: calor, pressão, umidade e um catalizador, sendo o painel de partículas também chamado de aglomerado – *chipboard*.

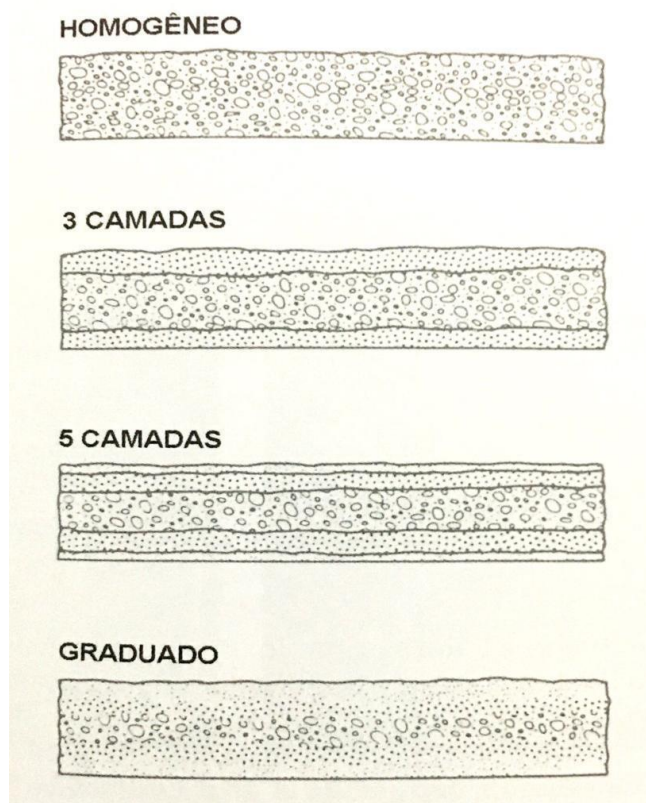
A *American Society for Testing and Materials* – ASTM (2016) define painéis de partículas como um termo genérico para painéis compósitos constituídos por materiais celulósicos geralmente no formato de pequenas partículas, coladas entre si com um sistema de colagem que pode conter aditivos.

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2013) painéis de partículas são constituídos de partículas de madeira aglutinada com resina sintética termofixa que se consolidam sob a ação conjunta de calor e pressão.

De acordo com Iwakiri (2020) painéis de madeira aglomerada (painéis de partículas) são aqueles produzidos com partículas de madeira encoladas normalmente com resina, com distribuição aleatória das partículas e consolidado através de prensagem a quente.

Segundo Moslemi (1974) os painéis de partículas podem ser classificados quanto ao método de distribuição de partículas em três grupos: Homogêneo; Multicamadas e Camadas Graduadas, apresentando respectivamente distribuição uniforme das partículas, distribuição por camadas ou níveis com variação da granulometria, sendo as camadas internas constituídas de partículas de maior dimensão, e por fim, distribuição gradual das partículas de diferentes granulometrias com partículas menores nas faces e maiores no centro (Figura 5).

Figura 5 - Esquema de distribuição de partículas por classe de painéis de partículas.



Fonte: Iwakiri (2020)

2.2.2 Histórico

O desenvolvimento de painéis de madeira reconstituída se deu na Europa, mais especificamente na Alemanha na década de 1940. Sua concepção foi motivada, devido à falta de madeira de boa qualidade para abastecer os setores produtivos que demandavam esta matéria-prima devido às dificuldades enfrentadas no curso da Segunda Guerra Mundial. Os painéis se destacaram como alternativa ao emprego da madeira maciça (madeira serrada) uma vez que demandavam madeira de menor qualidade e até proveniente de resíduos que antes não seriam aproveitados (IWAKIRI, 2020).

Pfeil (2003) afirma que produtos derivados de madeira fabricados no formato de placas tiveram origem a partir de resíduos de madeira serrada, sendo convertidos posteriormente em partículas e flocos e então colados sob pressão. Segundo o autor, estes painéis eram destinados em sua maioria à indústria moveleira.

Com o pós-guerra, em 1946 a produção de painéis passou por diversos aperfeiçoamentos do processo produtivo e equipamentos, desenvolvidos com tecnologia norte americana, buscando um melhor desempenho de suas propriedades (IWAKIRI, 2020).

Em meados da década de 1960 a produção de painéis se instaurou no Brasil, na cidade de Curitiba-PR e com o passar do tempo e a incorporação de novos materiais se consolidou no território nacional.

2.2.3 Desempenho econômico e industrial

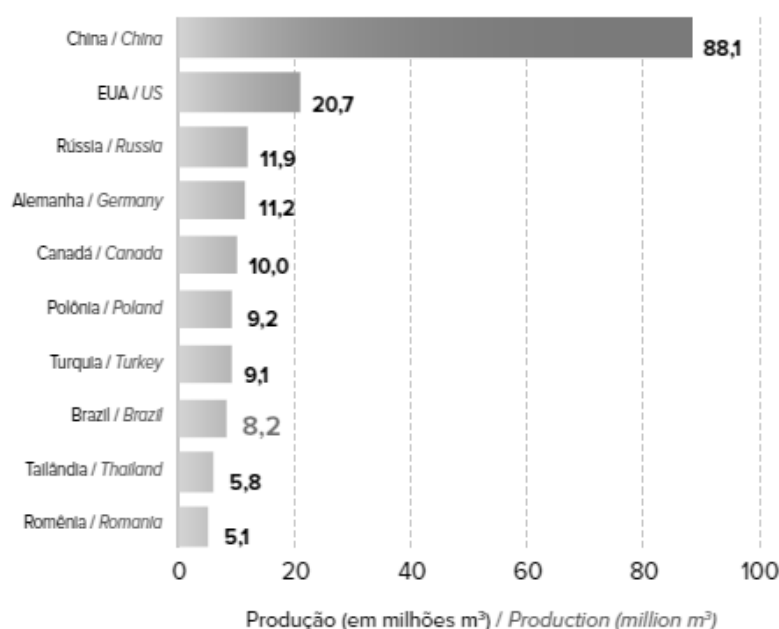
De acordo com o mais recente Panorama de Mercado de Painéis de Madeira apresentado pelo Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES (2014) a demanda global de painéis de madeira está intimamente relacionada à construção civil devido à construção direta de edificações que demandam este insumo e também ao seu acabamento e mobiliário.

O crescimento do setor, desde 1995, corresponde a uma taxa de 4,7% ao ano, superior ao Produto Interno Bruto – PIB nacional que apresentou desempenho de 3,7% a.a. e muito melhor em relação ao índice atribuído à madeira serrada (maciça) de modestos 0,3% a.a.

A produção industrial de painéis de madeira reconstituída no Brasil atingiu a marca de 8,2 milhões de metros cúbicos, apresentando um aumento de 2,8% em relação ao ano anterior (IBÁ, 2019). Mesmo diante da desaceleração econômica mundial devida à pandemia de SARS-CoV-2 o volume de vendas de painéis de madeira atingiu 6,9 milhões de metros cúbicos, sendo o MDP responsável por 41% (IBÁ, 2020).

Em um contexto mundial, a produção brasileira de painéis reconstituídos figura na oitava posição, a frente de países como Tailândia e Romênia (Figura 6).

Figura 6 - Principais produtores mundiais de painéis reconstituídos.



Fonte: IBÁ (2019)

Desta produção, cerca de 16% dos painéis são destinados à exportação, enquanto os 84% restantes são absorvidos pelo mercado interno (IBÁ, 2019).

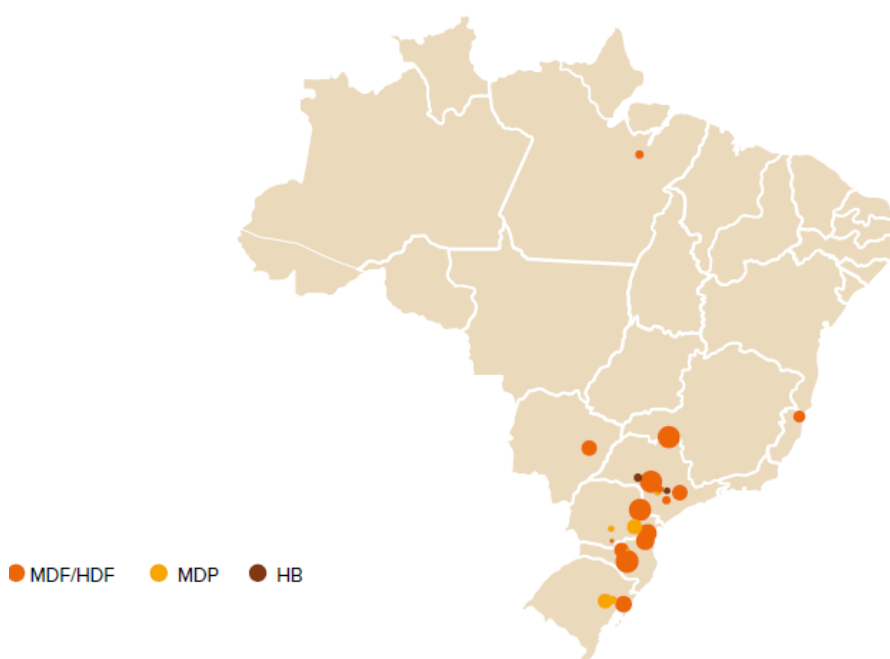
Entretanto, o Brasil tem alto potencial de aumento nas taxas de comercialização de painéis, visto que atualmente exporta elevada quantidade de partículas de madeira sem nenhum beneficiamento, como cavacos. No ano de 2018 o volume exportado foi de expressivos 6,5 milhões de metros cúbicos, gerando uma receita com baixo valor agregado de 144,3 milhões de dólares (SNIF, 2019).

No mesmo ano, a exportação de painéis de partículas (painéis de madeira aglomerada – partículas e outros) gerou uma receita próxima a 91 milhões de dólares com 316,7 mil toneladas de produto exportado.

Segundo o Estudo Setorial realizado pela Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente – ABIMCI (2017) as exportações ligadas ao setor florestal brasileiro movimentaram um montante de 10,2 bilhões de dólares, sendo que destes, 21% (2,18 bilhões) eram provenientes da indústria madeireira e moveleira.

A distribuição de unidades industriais produtoras de painéis de madeira reconstituída no Brasil é apresentada na Figura 7 abaixo.

Figura 7 - Distribuição de unidades industriais produtoras de painéis de madeira reconstituída no território nacional por tipo de produção.



* MDF – *Medium Density Fibreboard*; HDF – *Hight Density Fibreboard*; MDP – *Medium Density Particleboard* e HB – *Hardboard*

Fonte: IBÁ (2019)

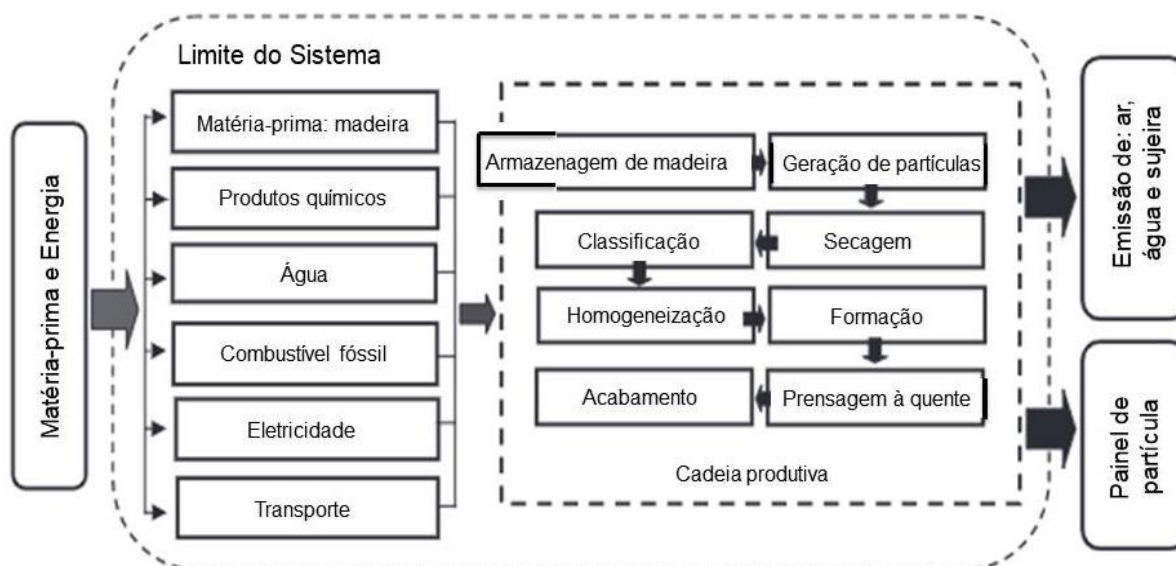
Sua disposição é concentrada nas regiões Sul e Sudeste mantendo-se próxima aos maiores polos consumidores e canais exportadores, contribuindo a localização para o escoamento da produção. Além disto, há ainda o benefício com a proximidade geográfica dos fornecedores de matéria-prima, oriunda de florestas plantadas, como foi apresentado na Figura 1.

2.2.4 Fabricação

Penchah *et al.* (2016) estudaram a fundo o processo de produção de painéis de partículas através do ciclo de vida, delimitando o sistema, desde a origem da matéria-prima até as etapas produtivas finais.

A Figura 8 a seguir apresenta de forma coesa as etapas da cadeia produtiva de painéis de partículas, e leva em consideração, não apenas a demanda por matéria-prima, mas também das diversas energias consumidas no processo.

Figura 8 - Delimitação do sistema de produção de painéis de partículas.



Fonte: Penchah *et al.* (2016) (Traduzido pelo autor)

Do ponto de vista da cadeia produtiva brasileira, o processo fabril é semelhante e segundo Iwakiri (2020) pode ser caracterizado pelas seguintes etapas: geração de partículas; secagem de partículas; classificação de partículas; aplicação do adesivo e aditivo(s); formação do colchão de partículas; pré-prensagem; prensagem a quente; resfriamento e acondicionamento; acabamento; classificação; embalagem e por fim armazenamento.

A Figura 9 a seguir apresenta um fluxograma desenvolvido pelo BNDES que apresenta de forma detalhada o processo.

Figura 9 - Fluxograma contendo o processo de produção de MDP.



Fonte: BNDES (2010)

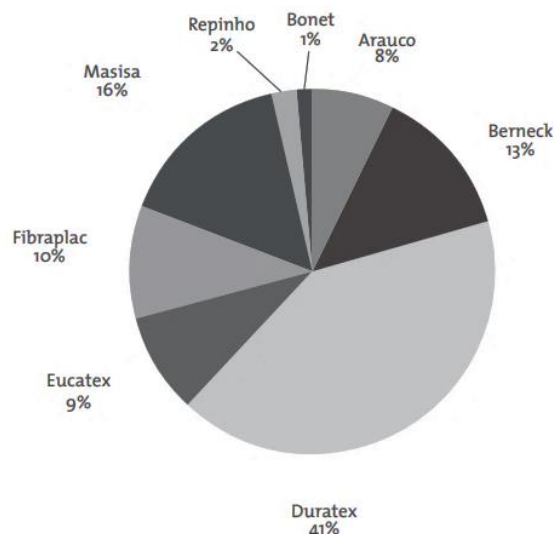
Quanto à distribuição da produção nacional de painéis de partículas de média densidade, há uma concentração produtiva em um número reduzido de empresas nacionais e multinacionais com sede no Brasil.

A disposição se dá entre oito principais companhias, sendo elas: Arauco; Berneck; Bonet; Duratex; Eucatex; Fibraplac; Masisa e Repinho (BNDES, 2014).

O estado do Paraná possui a maior quantidade de empresas produtoras de MDP, sendo elas: Arauco, Berneck, Brasfibra e Repinho enquanto o estado de São Paulo, detentor do maior número de empresas moveleiras do país – principais consumidoras dos painéis – possui plantas instaladas da Duratex e Eucatex (IBÁ, 2020).

A Figura 10 a seguir apresenta algumas das principais representantes do setor no Brasil, com suas respectivas capacidades produtivas discriminadas.

Figura 10 - Capacidade de produção de MDP no Brasil.



Fonte: BNDES (2014)

2.2.5 Características gerais

Os painéis de partículas podem ser caracterizados por diversos fatores, dentre eles destaca-se a caracterização quanto à densidade. Neste sentido, a ASTM (2016) e a ANSI (1999) classificam os painéis em três grupos, sendo eles: *low-density* (baixa densidade); *médium-density* (média densidade) e *high-density* (alta densidade).

O primeiro grupo reúne painéis que apresentam densidade abaixo de 640 kg/m³, o segundo, delimita um intervalo de 640 kg/m³ a 800 kg/m³ e, por fim, o último grupo é integrado por painéis com densidade superior a 800 kg/m³.

Entretanto, no Brasil, a ABNT (2013) classifica como Paineis de Partículas de Média Densidade – *Medium Density Particleboard* (MDP), aquele que tenha densidade compreendida entre os limites inferior e superior de 551 kg/m³ e 750 kg/m³ respectivamente.

Outra característica geral de painéis de partículas é a isotropia, propriedade que confere igualdade de comportamento frente a ações solicitantes oriundas de diferentes direções cartesianas (longitudinal, radial e tangencial), concedendo ao painel elevada estabilidade dimensional. Esta propriedade difere os painéis dos elementos de madeira maciça, favorecendo-os, uma vez que as peças serradas apresentam comportamento anisotrópico (PFEIL, 2003).

Além disto, elementos de madeira maciça serrada apresentam limitações e defeitos que não são encontrados nos painéis de partículas (madeira recomposta). Dentre elas, a limitação geométrica, tanto em comprimento quanto em espessura, que está atrelada às dimensões no lenho de origem.

Fatores redutores da resistência como, abertura de fissuras ou fendas no sentido longitudinal das fibras e a presença de nós ao longo da peça, comuns em elementos de madeira serrada, não existem em painéis de partículas devido ao controle de variáveis no processo fabril (PFEIL, 2003; IWAKIRI, 2020).

Além disto, os painéis de partículas têm como característica o melhor aproveitamento da matéria-prima empregada, uma vez que apresentam menor restrição da qualidade da tora, não interferindo o diâmetro ou a forma do fuste (IWAKIRI, 2020).

Esta elevada tolerância quanto à exigência da matéria-prima é vista também diante da possibilidade do emprego de madeiras de rápido crescimento e baixa densidade, podendo estas, serem empregadas na confecção de partículas para a produção de painéis. Ademais, há a possibilidade de emprego de outros materiais de origem lignocelulósica.

Boding e Jayne (1982) citados por Dias (2005) elencam algumas das características favoráveis dos painéis de partículas em relação a outros produtos de madeira reconstituída e, inclusive, à madeira serrada. Dentre elas estão a eliminação dos efeitos da anisotropia; a equivalência de resistência do painel quando solicitado em diferentes direções; a eliminação de fatores redutores de resistência como nós, inclinação de grã e idade do lenho; a menor exigência de matéria-prima como diâmetro e forma do fuste; o menor custo de produção e mão de obra e por fim a possibilidade de controle das propriedades físico-mecânicas através alterações no processo produtivo, como o tipo da resina, geometria das partículas e densidade dos painéis.

As propriedades dos painéis produzidos, no Brasil, são avaliadas de acordo com as premissas da ABNT (2013; 2018).

Aferições de espessura, comprimento, largura e esquadro dos painéis e dos respectivos corpos de prova, deles extraídos, permitem a realização de ensaios físicos e mecânicos como de densidade, teor de umidade, inchamento após 24 horas, resistência à tração perpendicular, módulo de resistência à flexão estática e

módulo de elasticidade, estabelecendo critérios que os classificam e delimitam sua utilização.

2.2.6 Classificação

A ABNT (2018) apresenta um critério de classificação de MDP's que leva em consideração as características estruturais e a umidade do ambiente a que ele é exposto. Os tipos de painéis são apresentados a seguir:

- P2 – Painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
- P3 – Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- P4 – Painéis estruturais para uso em condições secas;
- P5 – Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- P6 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições secas;
- P7 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas.

A ANSI (1999) classifica os painéis de partículas como: High Density (H), Medium Density (M) e Low Density (LD). Acompanhados de um segundo dígito (1, 2 ou 3) que indica o grau de identificação, sendo o dígito 3 o mais exigente, referente à características especiais de durabilidade.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DOS PAINÉIS

Diversos aspectos interferem direta ou indiretamente nas propriedades finais dos painéis de partículas. De certa forma, estes fatores podem estar relacionados entre si, de modo que a variação em um deles reflita no comportamento de outro. Seguem abaixo elencados alguns dos fatores que influenciam as propriedades finais dos painéis e que guardam relação com as investigações deste estudo.

2.3.1 Teor de umidade das partículas

O teor de umidade das partículas tem grande influência no comportamento final do painel produzido devido a reação com o adesivo utilizado. Para bem avaliar sua interferência é necessário partir do estudo do teor de umidade da matéria-prima empregada na produção das partículas, pois, de acordo com Iwakiri (2020), o teor de umidade das toras de madeira nos instantes que antecedem o processo de trituração interfere inclusive no rendimento da produção de partículas.

Quando muito seca, dificulta o controle da geometria das partículas, gerando maior quantidade de finos e fazendo com que as lâminas do triturador necessitem de mais energia. Do contrário – quando o teor de umidade está muito elevado – pode dificultar a trituração, gerando entupimento do maquinário, além de maior gasto de tempo e de recursos com a secagem das partículas.

Baharoglu *et al.* (2012) estudaram a fundo a interferência do teor de umidade das matérias-primas nas propriedades físicas e mecânicas de painéis de partículas produzidos com UF, como inchamento em espessura, módulo de ruptura, módulo de elasticidade e resistência à tração perpendicular. Os pesquisadores experimentaram cinco diferentes níveis de umidade da madeira antes do processo de produção de partículas (*chipping process*), sendo eles: 20%, 40%, 60%, 80% e 95%.

Foi observado que uma variação no teor de umidade da madeira superando um limite mínimo e máximo influenciava negativamente o comportamento dos painéis. De acordo com os autores o aumento no teor de umidade de 60% para 80% e 95% aumentou o inchamento em espessura e diminuiu as propriedades de resistência mecânica significativamente. Por outro lado, toras de madeira com umidade abaixo de 20% resultaram em painéis de partículas com os piores valores de propriedades físicas e mecânicas.

Fica evidenciado que a falta de controle de umidade no momento da produção do particulado, pode resultar em uma considerável variação do produto produzido, podendo a quantidade de água chegar a 50% do peso total do particulado, e a outra metade, apenas, ser referente à fibra de madeira (FAO, 2020).

No entanto, avaliações posteriores ao processo de produção de partículas podem ser realizadas com o intuito de aferir o teor de umidade efetivo do particulado e a partir deste, empregar metodologias para sua correção visando alcançar o percentual desejado.

Segundo Iwakiri (2020) o teor de umidade das partículas contribui com grande influência sobre a cura da resina. No processo industrial as partículas devem ser secas a um teor de umidade abaixo de 3%, de forma homogênea, buscando o menor tempo e custo possível, além de atentar para um controle quanto à combustão e incêndios no secador.

No estudo de painéis aglomerados diversos pesquisadores propuseram diferentes teores de umidade para as partículas, das mais diversas origens. Cravo *et al.* (2017) estudaram o emprego de resíduos não convencionais de sacos de cimento para serem usados como partículas para produção de painéis. Foi estipulado um teor de umidade de 8% para o particulado.

Owodunni *et al.* (2020) realizaram estudos para produção de painéis de partículas de média densidade com fibra de coco e três diferentes tipos de adesivos naturais. Os autores adotaram um teor de umidade da fibra de coco de 5%.

Zhang e Hu (2014) propuseram um teor de umidade da fibra de coco para produção de painéis de partículas de 3% com intervalo de variação aceitável de um ponto percentual ($3\% \pm 1\%$).

Fiorelli *et al.* (2012) adotaram teor de umidade em torno de 2% e 3% para produção de painéis de partículas de fibra de coco com densidades de $0,8 \text{ g/cm}^3$ e $1,0 \text{ g/cm}^3$.

2.3.2 Densidade das partículas

Dentre as variáveis de um painel de partículas, a densidade tem elevada influência em suas propriedades. Segundo Maloney (1977) a melhor forma de melhorar as propriedades de um painel de madeira reconstituída é aumentar o peso específico do painel. O autor defende que, a densidade da madeira é o fator mais importante a se observar na matéria-prima, pois tem influência direta na densidade e qualidade do painel produzido.

De acordo com Iwakiri (2003) e Maloney (1996) apud Dias (2005) a madeira destinada à produção de painéis de partículas deve ter baixa densidade a fim de que a razão de compactação (razão entre a densidade do painel e a densidade da madeira das partículas) resulte em pelo menos 1,3, contribuindo para elevação da densificação dos painéis produzidos.

Partículas de madeira podem dar origem a painéis mais ou menos densos que a madeira de origem, sendo rara a situação em que um metro cúbico de madeira maciça corresponda a um metro cúbico de painel de partículas produzido. Por esta razão grande parte dos painéis produzidos é calculada a partir do peso das partículas ao invés de seu volume (FAO, 2020).

Com efeito, quanto menor a densidade da madeira das matérias-primas, maior será o volume de partículas de material empregado para produção de determinada quantidade de painéis. Como exemplo, para produção de painéis com densidade efetiva de 760 kg/m^3 seriam necessários, teoricamente, 2 m^3 de madeira com densidade de 380 kg/m^3 e apenas $1,65 \text{ m}^3$ de madeira com 460 kg/m^3 (FAO, 2020).

2.3.3 Geometria das partículas

Todos os produtos particulados de madeira tem origem em elementos de madeira maciça de diversas variedades de espécies. São obtidos através do processo de trituração de toras resultando em partículas heterogêneas (FAO, 2020).

Partículas de madeira como lascas, serragem, flocos e aparas, podem ser medidas em volume e peso. A partir de $1,0 \text{ m}^3$ de madeira maciça, obtêm-se em média $2,8 \text{ m}^3$ de cavacos ou $2,87 \text{ m}^3$ de serragem. Este considerável ganho de volume se dá em virtude do deslocamento das partículas entre si, causado por sua geometria irregular, resultando em vazios entre elas (FAO, 2020).

As partículas de serragem apresentam um ganho volumétrico superior às partículas de cavacos em razão de sua maior área superficial específica (área de contato entre as partículas) uma vez que o diâmetro médio das partículas de serragem é inferior às de cavaco.

De acordo com Iwakiri (2020), partículas com maior superfície específica terão uma maior interação externa, resultando em uma maior demanda por resina (consumo relativo de resina ou disponibilidade de resina) para aglomeração das partículas por unidade de área de painel produzido. Portanto, a redução ou eliminação dos “finos” contribui para uma diminuição no consumo de adesivo.

São empregadas, no processo produtivo, peneiras vibratórias que classificam as partículas em função das dimensões, podendo ser utilizada uma ou mais peneiras de diferentes malhas sobrepostas.

Pfeil (2003) afirma que as características das placas (painéis) são intimamente dependentes da dimensão das partículas utilizadas como material de enchimento e do adesivo utilizado para sua aglutinação.

Drovou *et al.* (2019) estudaram a interferência da granulometria de partículas de origens alternativas na produção de painéis. Foram propostos quatro grupos granulares, sendo eles: $1,6 < g \leq 5,0$; $0,8 < g \leq 1,6$; $g \leq 0,8$ (cm) e por fim serragem não peneirada (crua).

Todos os painéis produzidos obtiveram densidade entre 640 kg/m^3 e 800 kg/m^3 . Os autores observaram que a granulometria das partículas influenciou na densidade dos painéis, sendo mais denso o painel quando mais finas as partículas. Além disto, os valores de MOR e MOE também foram influenciados pela granulometria, sendo os painéis menos resistentes, aqueles produzidos com partículas de dimensões menor ou igual a 0,8 centímetro.

2.4 PARTÍCULAS

A madeira como material de reflorestamento, de origem biológica e renovável, supre grande parte da demanda de matéria-prima para produção de painéis de partículas, contribuindo com parcela significativa em processos da construção civil e indústria moveleira.

No entanto, atualmente, inúmeras pesquisas ao redor do mundo buscam pelos mais diversos materiais com característica lignocelulósica como alternativa à madeira para produção de painéis de partículas. Materiais como casca de arroz, juta, caroço de azeitona, palha de trigo, folhas e fibras de tamareiras e de coqueiros, dentre outros, vem sendo estudados (NICOLAO *et al.* 2020; FARAG *et al.* 2020; HÝSKOVÁ *et al.* 2020; ALHARBI *et al.* 2020; SANTOS *et al.* 2021; MAHIEU *et al.* 2021; MARTINS *et al.* 2021; NGUYEN *et al.* 2020; WONG *et al.* 2020).

2.4.1 Fibra de Coco

O cultivo de coco (*Cocos nucifera*) apresenta grande importância socioeconômica com alta flexibilidade na destinação de seus produtos, subprodutos e resíduos, que atualmente são considerados como coprodutos, devido ao elevado valor agregado que possuem. Conhecida mundialmente como “árvore da vida” o

coqueiro movimenta de forma expressiva as indústrias alimentícia e cosmética (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2010; 2018).

Atualmente esta cultura está presente em mais de 90 países ao redor do mundo, com destaque para Indonésia, Filipinas e Índia, que juntos detêm 72,6% da área plantada e 72,8% da produção mundial. O Brasil dispõe de uma área plantada correspondente a 1,7% em relação à mundial, entretanto, apresenta um elevado rendimento comparado a outros países, correspondendo a 3,8% da produção mundial (BRAINER, 2018).

Este alto rendimento está relacionado ao cenário da produção de coco no Brasil, que passou por drástica mudança nas últimas décadas, deixando de ser um cultivo de baixa escala em comunidades litorâneas, para se tornar uma produção com alto investimento de capital, ciência e tecnologia, em todas as regiões do país (CAVALCANTE, 2015).

A safra nacional do ano de 2018 apresentou um rendimento médio de 7.873 kg de fruto por hectare plantado, 59,92% superior à safra do ano 2000 com taxa de 4.923 kg/ha, de acordo com o IBGE (2019a).

O rendimento para este ano é ainda maior na região Sudeste (15.381 kg/ha) e Centro-Oeste (12.144 kg/ha), enquanto a produtividade média no Nordeste brasileiro teve média de 6.895 kg/ha.

No entanto, a região Nordeste contribuiu com 71,23% da produção nacional. Estados como Bahia (344,8 mil toneladas), Ceará (254,2 mil toneladas) e Sergipe (174,4 mil toneladas) lideraram a lista dos maiores produtores do fruto, seguidos pelo estado do Espírito Santo (150,1 mil toneladas) (IBGE, 2019a).

No ano de 1974 a produção nacional de coco foi de 498.202 toneladas de fruto ao passo que em 2018 atingiu a significativa marca de 1.564.500 toneladas distribuída em 199.624 hectares de cultivo (IBGE, 2019a).

Parte desta produção é destinada ao mercado externo após beneficiamento. De acordo com os dados levantados pelo Sindicato Nacional dos Produtores de Coco do Brasil – SINDCOCO (2020) o balanço comercial brasileiro de produtos derivados do coco para os meses de janeiro e fevereiro de 2020 foi positivo, resultando em um total de importações de 1,92 milhões de dólares e exportações de 2,78 milhões de dólares.

Parcela significativa da exportação brasileira, a água de coco integral pronta para o consumo, movimentou 40 milhões de dólares no ano de 2018. O estado do Ceará exportou 33.438 toneladas, representando 92,28% da exportação nacional. Trinta e três países importaram do Brasil, dentre eles, destacam-se Estados Unidos e Canadá (SINDCOCO, 2019).

Frente à representatividade brasileira no setor, com considerável produção agrícola e industrial, um olhar crítico deve ser voltado às sobras dos processos produtivos, como as cascas dos frutos.

Brainer (2018) apresenta diversas características quantitativas, por variedade de coqueiro, quanto à produção de frutos. A Tabela 1 destaca algumas delas.

Tabela 1 - Principais características quantitativas relacionadas à produção por variedade de coqueiro.

Características	Variedades de coqueiro		
	Anão	Híbrido	Gigante
Vida útil (ano)	30 a 40	50 a 60	60 a 80
Produção (frutos/planta/ano)	150 a 200	130 a 150	60 a 80
Peso do fruto (g)	900	1200	1400

Fonte: Adaptado de BRAINER (2018)

De acordo com a EMBRAPA (2010) em torno de 57% do fruto diz respeito à casca (mesocarpo), destes 30% podem ser transformados em fibras após beneficiamento.

Índia, Sri Lanka, Tailândia e Filipinas figuram como maiores produtores de fibra de coco do mundo. As fibras do mesocarpo podem ser empregadas para produzir desde mantas, tapetes, vasos, fibra para colchão e enchimento para bancos automobilísticos, até para barreiras de isolamento acústico e contenções de encostas. No Brasil os estados de Sergipe, Ceará e Pernambuco se destacam na produção nacional de fibras (EMBRAPA, 2010; BRAINER, 2018).

Contudo, o aproveitamento da casca de coco para produção de fibra no Brasil ainda é baixo, o estado do Sergipe, expoente nacional, tem uma taxa de aproveitamento que gira em torno de 30% da produção (EMBRAPA, 2010). Grande parte das cascas são incineradas ou descartadas de forma irregular (Figura 11).

Figura 11 - Descarte de casca de coco no meio ambiente.



Fonte: EMBRAPA (2010)

Outra finalidade que pode ser dada às fibras de coco, como estratégia econômica, social e ambiental é sua utilização como matéria-prima lignocelulósica alternativa à madeira para produção de painéis de partículas (EMBRAPA, 2011; FIORELLI, 2019).

2.4.2 Pínus

A definição da palavra pínus de acordo com Houaiss (2001) é apresentada a seguir.

[...] design. comum às árvores do gên. *Pinus*, da fam. das pináceas, que reúne 93 spp. monoicas, com madeira resinosa e longas folhas aciculares, que ocorrem nas regiões temperadas do hemisfério norte, tb. da América Central à do Sul, e em Sumatra e Java, tb. conhecidas como pinho e pinheiro [Incluem algumas das árvores mais cultivadas, desde a Antiguidade, esp. pela madeira e pela polpa us. no fabrico de papel [...]] (HOUAISS, 2001, p. 2218).

O gênero *Pinus* pertence ao grupo das gimnospermas, também denominadas coníferas. É classificado como exótico no Brasil, sendo encontrado em grandes áreas de reflorestamento. Seu cultivo é altamente difundido devido ao desenvolvimento de técnicas florestais e a excelente adaptação ao meio, fazendo do Brasil referência mundial no setor (IBÁ, 2020).

De acordo com Iwakiri (2020), as espécies de coníferas são as mais empregadas na produção de painéis de partículas, devido à baixa densidade de sua madeira.

Diversas quantidades de espécies pertencem a este gênero. A ABNT (1997a) intitulada: Projetos de Estruturas de Madeira traz em seu Anexo - E algumas das espécies mais frequentes no Brasil (Tabela 2).

Tabela 2 - Nomenclatura e valores médios de massa específica aparente de madeiras de reflorestamento do gênero *Pinus*.

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap}(12\%)^{**}$ kg/m ³
<i>Pinus caribea</i>	<i>Pinus caribear. caribea</i>	579
<i>Pinus bahamensis</i>	<i>Pinus caribear. bahamensis</i>	537
<i>Pinus hondurensis</i>	<i>Pinus caribear. hondurensis</i>	535
<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus elliottivar. elliottii</i>	560
<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus oocarpashiede</i>	538
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda L.</i>	645

****** $\rho_{ap}(12\%)$ é a massa específica aparente da peça maciça a 12% de umidade.

Fonte: Adaptado de ABNT (1997a)

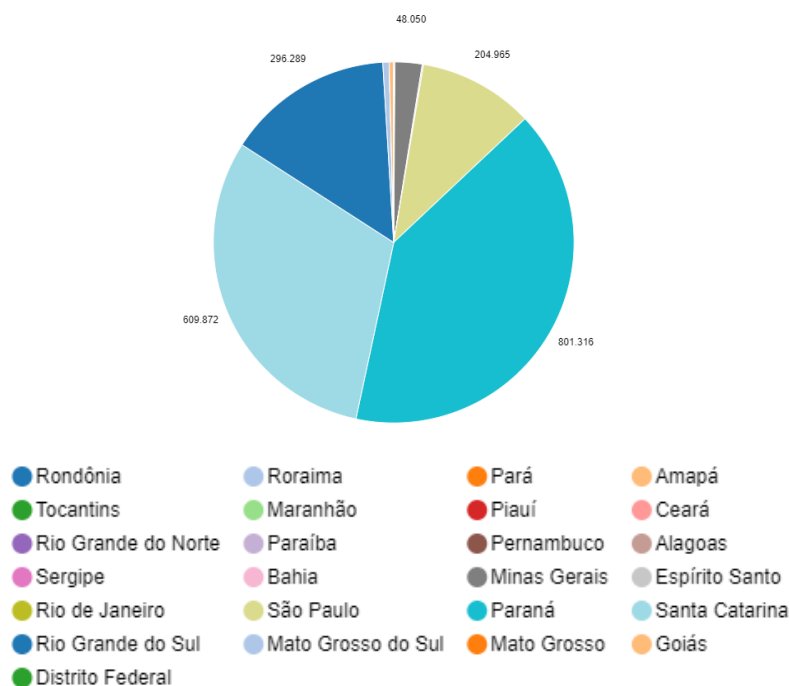
As florestas de madeira reflorestada de pínus ocupavam cerca de 1.611.338 hectares do território nacional no ano de 2013, passando à marca de 1.984.333 no ano de 2018 (IBGE, 2019b).

A distribuição do cultivo de pínus no Brasil é concentrada na Região Sul com 1.707.477 hectares de florestas plantadas, com destaque para os estados do Paraná com 810.316 hectares e de Santa Catarina 609.872 hectares que juntos detém 83,17% da produção nacional (Figura 12).

A cultura não está presente nos estados de Roraima, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Mato Grosso (IBGE, 2019b).

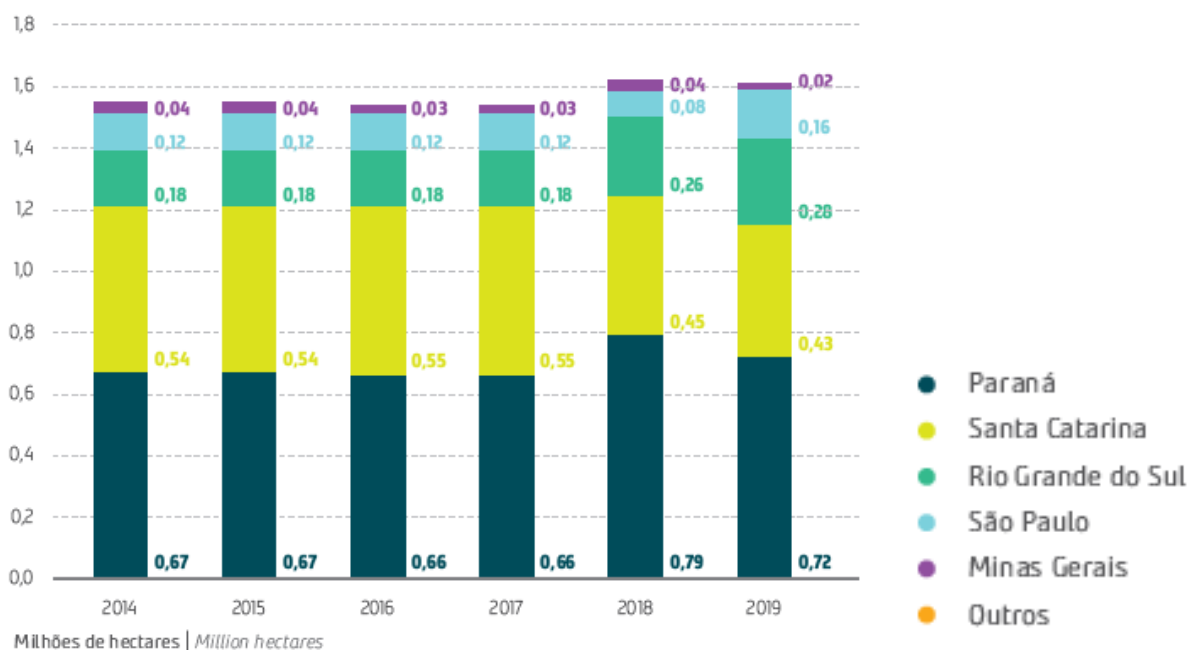
Em seguida, a Figura 13 apresenta a evolução da área plantada por estados brasileiros de maior representatividade entre os anos de 2014 e 2019.

Figura 12 - Distribuição de florestas plantadas de pinus por estado brasileiro.



Fonte: IBGE (2019b)

Figura 13 - Evolução da área plantada de pinus no território brasileiro por estado.



Fonte: IBÁ (2020)

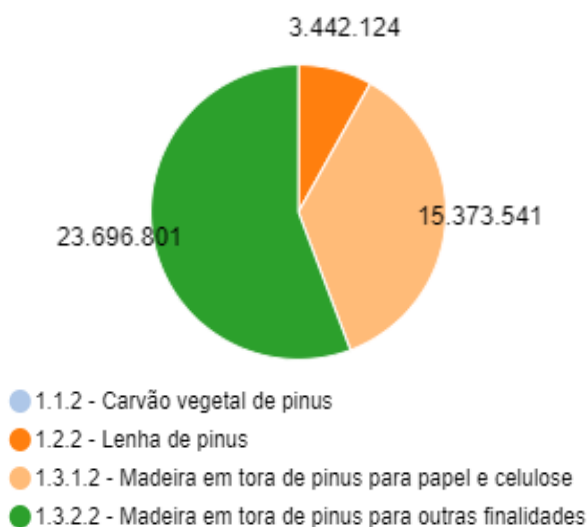
No entanto, quanto à produtividade, o setor brasileiro de madeira de reflorestamento se destaca frente a outros países produtores com melhor rendimento em relação a países como China, Estados Unidos, Rússia e Canadá,

considerando o volume de madeira produzido por área ao ano, evidenciando a excelente adaptação desta cultura exótica ao país.

O cultivo de pínus apresentou produtividade média de 31,3 m³/ha no ano de 2018 de acordo com o IBÁ (2020).

A destinação da produção nacional se divide em quatro principais segmentos, sendo o de menor expressão voltado à produção de carvão vegetal com marca de 6.835 toneladas de madeira de pínus (IBGE, 2019c). A Figura 14 a seguir apresenta os demais segmentos consumidores com valores expressos em metros cúbicos de madeira. Mais da metade da destinação de madeira de reflorestamento é voltada à produção de madeira serrada e partículas de madeira para produção de painéis.

Figura 14 - Volume (m³) de madeira de reflorestamento de pínus por segmentos de destino no Brasil.



Fonte: IBGE (2019c)

2.4.3 Eucalipto

A seguir é apresentada a definição da palavra eucalipto de acordo com Houaiss (2001).

[...] design. comum aos arbustos e árvores do gên. *Eucalyptus*, da fam. das mirtáceas, que reúne cerca de 600 spp. e vários híbridos, de madeira amarela a vermelha, folhas coriáceas, ger. lanceoladas e com glândulas oleíferas, flores freq. em umbelas e frutos capsulares [A maioria é nativa da Austrália (algumas do leste da Malásia) e são muito cultivadas para reflorestamento, pelo rápido crescimento, e tb. pela madeira, para produção de celulose e extração do óleo de Eucalipto.] [...] (HOUAISS, 2001, p. 1273).

O gênero *Eucalyptus* pertence ao grupo das angiospermas, também conhecidas por madeira frondosa ou folhosa. Assim como o gênero *Pinus*, é classificado como exótico e extremamente difundido como madeira de reflorestamento no Brasil.

O gênero conta com elevada quantidade de espécies. A ABNT (1997a) destaca algumas das mais encontradas no Brasil (Tabela 3), presentes em um número superior ao das espécies do gênero *Pinus*, muito por conta do domínio territorial do cultivo da madeira de eucalipto (76,2%) frente ao cultivo de madeira de pínus (20,1%) (IBGE, 2018).

Tabela 3 - Nomenclatura e valores médios de massa específica aparente de madeiras de reflorestamento do gênero *Eucalyptus*.

Nome comum	Nome científico	ρ_{ap} (12%)** kg/m ³
<i>E. Alba</i>	<i>Eucalyptusalba</i>	705
<i>E. Camaldulensis</i>	<i>Eucalyptuscamaldulensis</i>	899
<i>E. Citriodora</i>	<i>Eucalyptuscitriodora</i>	999
<i>E. Cloeziana</i>	<i>Eucalyptuscloeziana</i>	822
<i>E. Dunnii</i>	<i>Eucalyptusdunnii</i>	690
<i>E. Grandis</i>	<i>Eucalyptusgrandis</i>	640
<i>E. Maculata</i>	<i>Eucalyptusmaculata</i>	931
<i>E. Maidene</i>	<i>Eucalyptusmaidene</i>	924
<i>E. Microcorys</i>	<i>Eucalyptusmicrocorys</i>	929
<i>E. Paniculata</i>	<i>Eucalyptuspaniculata</i>	1087
<i>E. Propinqua</i>	<i>Eucalyptuspropinqua</i>	952
<i>E. Punctata</i>	<i>Eucalyptuspunctata</i>	948
<i>E. Saligna</i>	<i>Eucalyptussaligna</i>	731
<i>E. Tereticornis</i>	<i>Eucalyptustereticornis</i>	899
<i>E. Triantha</i>	<i>Eucalyptustriantha</i>	755
<i>E. Umbra</i>	<i>Eucalyptusumbra</i>	889
<i>E. Urophylla</i>	<i>Eucalyptusurophylla</i>	739

** ρ_{ap} (12%) é a massa específica aparente da peça maciça a 12% de umidade.

Fonte: Adaptado de ABNT (1997a)

Madeiras de árvores folhosas de média densidade podem ser empregadas em misturas com espécies de baixa densidade para produção de painéis de

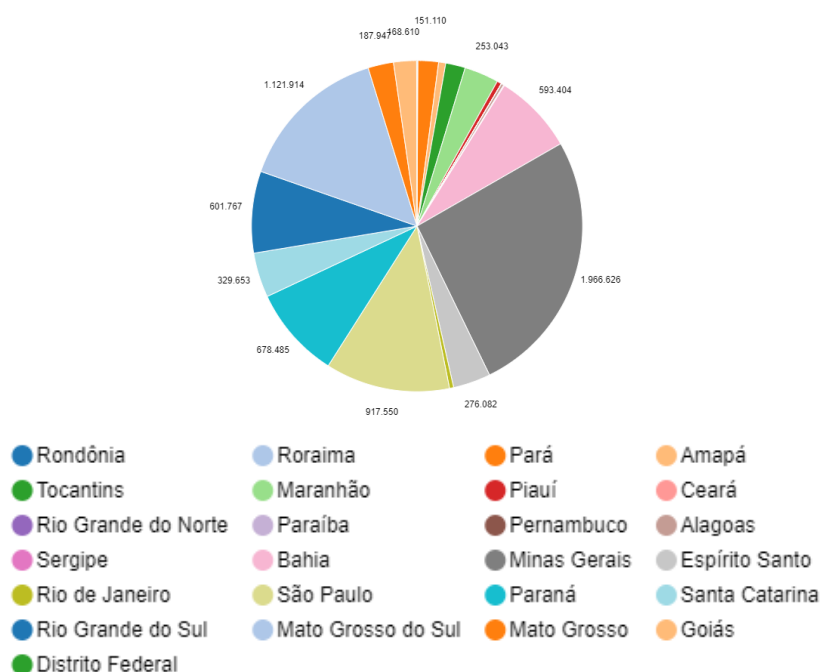
partículas. No Brasil, as madeiras mais empregadas para produção de painéis são as de eucalipto e pínus (IWAKIRI, 2020).

As florestas de madeira reflorestada de eucalipto ocupavam cerca de 6.315.444 hectares do território nacional no ano de 2013, passando à marca de 7.543.542 no ano de 2018 (IBGE, 2019b).

A distribuição do cultivo de eucalipto no Brasil é mais homogênea em relação ao cultivo de pínus, sendo ausente apenas nos estados de Roraima e Rio Grande do Norte.

A região Sul conta com 1.609.905 hectares de florestas plantadas, enquanto a região Sudeste apresenta a maior área plantada com 3.190.933 hectares. Destacam-se os estados de Minas Gerais com 1.966.626 hectares e do Mato Grosso do Sul com 1.121.914 hectares que sozinho representa 75,72% da área plantada da região Centro-Oeste (Figura 15).

Figura 15 - Distribuição de florestas plantadas de eucalipto por estado brasileiro.



Fonte: IBGE (2019b)

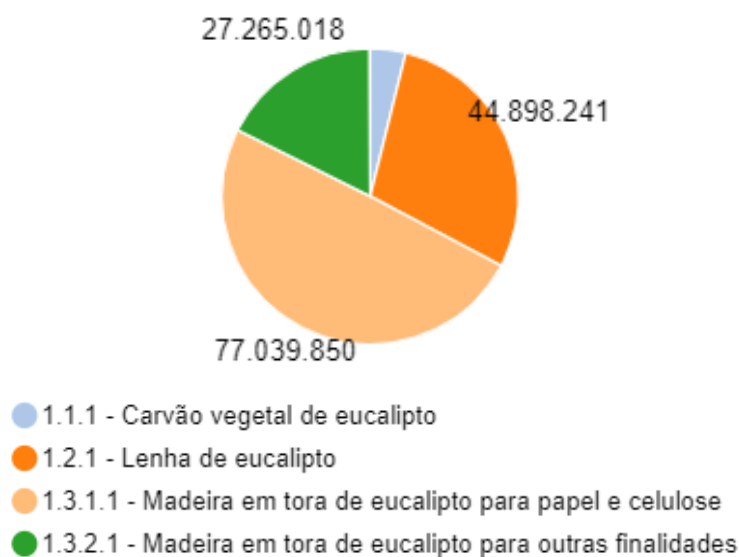
O cenário de distribuição nacional do cultivo apontou algumas mudanças nos últimos anos de acordo com o IBÁ (2020). Destaque para o estado do Mato Grosso do Sul que apresentou uma curva ascendente da produção no período.

Outro fator relevante é que o somatório da produção de estados de menor produtividade, como por exemplo, Amapá, Piauí e Rio de Janeiro, se destaca entre os maiores estados produtores. Este fato está diretamente relacionado à melhor distribuição territorial do cultivo.

A produtividade do cultivo apresentou média de 35,3 metros cúbicos de madeira de eucalipto por hectare de floresta plantada no ano de 2019 de acordo com o IBÁ (2020).

Quanto à destinação da produção nacional, assim como o pínus, a produção de carvão vegetal tem menor expressão frente às outras demandas, no entanto, atingiu a marca de se 6.004.846 toneladas de madeira de eucalipto (IBGE, 2019c). A Figura 16 abaixo apresenta os demais segmentos consumidores com valores expressos em metros cúbicos de madeira.

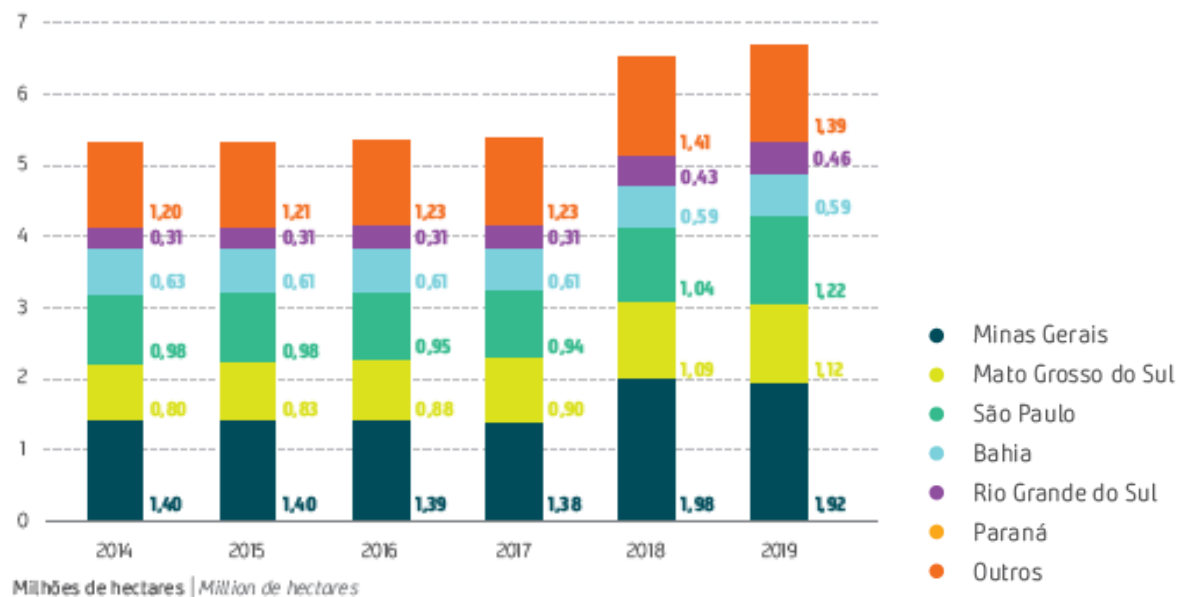
Figura 16 - Volume (m³) de madeira de reflorestamento de eucalipto por segmentos de destino no Brasil.



Fonte: IBGE (2019c)

A Figura 17 a seguir apresenta a evolução da área plantada entre os anos de 2014 e 2019, com destaque para os estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul que apresentaram aumento considerável na área de florestas plantadas de eucalipto.

Figura 17 - Evolução da área plantada de eucalipto no território brasileiro por estado.



Fonte: IBÁ (2020)

2.5 ADESIVO

O adesivo é um dos componentes empregados na fabricação de painéis de partículas com função de aglutinar as partículas de madeira ou materiais de origem lignocelulósica.

A ABNT (2013) define como adesivo ou resina a substância orgânica ou inorgânica utilizada com a finalidade de aderir partículas de madeira em um painel.

A ASTM (2016) apresenta uma definição de ligante – *binder* – como sendo um agente orgânico ou inorgânico usado para unir partículas com a finalidade de produzir um painel de partículas.

A classificação de adesivos como orgânicos ou inorgânicos depende de sua composição química. A classe de adesivos orgânicos se subdivide entre naturais e sintéticos, sendo estes os mais empregados pela indústria. Os inorgânicos têm geralmente por base silicatos (SKEIST, 1962; SELBO, 1975 apud DIAS, 2005).

Dentre os adesivos orgânicos naturais estão os derivados proteicos de origem animal ou vegetal, derivados de borracha e do éter celulósico. Os adesivos orgânicos sintéticos se subdividem em termoplásticos (polietileno, polistírol, borracha sintética) e termofixos, sendo estes ativados através de um catalizador ou de temperatura, destacando-se a ureia formaldeído, fenol formaldeído e os poliuretânicos (IWAKIRI, 2020).

2.5.1 Resina poliuretana (PU)

A Poliuretana (PU) é um compósito polimérico. De acordo com a ASTM (2019), compostos poliméricos são substâncias constituídas por dois ou mais materiais insolúveis, combinados entre si para formar um material de engenharia útil que possui propriedades não encontradas em seus constituintes.

Inicialmente, as resinas poliuretanas foram utilizadas para a confecção de chapas de madeira aglomerada, com as mesmas características das chapas produzidas com adesivos fenólicos, no entanto, apresentando vantagens de produzir painéis mais resistentes à umidade e de não liberar formaldeído durante o processo de produção (PETERSON, 1964 apud DIAS, 2005).

Atualmente a poliuretana é uma das classes de polímeros que vem sendo mais empregados, difundida em diversas áreas como na medicina, em setores automobilísticos e industriais por sua versatilidade (ALMEIDA, 2019).

2.5.2 Resina poliuretana bi componente PU-Mamona

A mamona (*Ricinus communis*) conhecida também por rícino é uma oleaginosa que pertence ao grupo das angiospermas, internacionalmente conhecida como *Castor Oil* ou *Castor Bean* (Figura 18).

Figura 18 - Mamona em floração



Fonte: Acervo do autor

A safra 2019/2020 de mamona no Brasil, no mês de abril de 2020, registrou marca de 45,6 mil hectares de área cultivada com produtividade média de 648 kg/ha, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2020). A estimativa para o final da safra é de uma produção de 29,5 mil toneladas.

A região nordeste se destaca como principal produtora, com destaque para a Bahia com produção concentrada em sua região centro-norte. A produção nacional é destinada ao mercado atacadista, cujo destino é o processamento industrial (CONAB, 2020).

A extração do óleo de mamona se dá a partir do processamento de suas sementes. Este produto conta com elevada quantidade de triglicerídeo do ácido ricinoléico (entre 84% e 91% de sua constituição) pouco frequente em outros óleos de origem vegetal (ALMEIDA, 2019).

Segundo Dias (2005), o óleo de mamona possibilita a sintetização de polióis e pré-polímeros com diferentes características que quando somados dão origem à poliuretana bi componente.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas com a poliuretana bi componente à base de mamona nas mais variadas áreas, dentre elas destacam-se as relacionadas à produção de biodiesel – como aponta a abrangente revisão literária publicada por

Bibin *et al.* (2020) – e como aglomerante de partículas lignocelulósicas para produção de painéis de partículas (FIORELLI *et al.*, 2019; VARANDA *et al.*, 2018; CRAVO *et al.*, 2017) contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico do tema e colaborando para a disseminação da utilização de materiais derivados de biomassa com menor impacto ambiental.

2.6 PAINÉIS DE PARTÍCULAS À BASE DE FIBRA DE COCO

Com base nas diversas investigações científicas que vem sendo realizadas em todo o mundo na linha de pesquisa de painéis reconstituídos, são apresentadas a seguir algumas das que compartilham das mesmas preocupações ambientais e de desempenho dos painéis deste estudo. As técnicas empregadas, metodologias adotadas e parâmetros avaliados pelos pesquisadores são apresentados a fim de enriquecer a discussão científica.

Com o intuito de descrever o processo produtivo de painéis com fibra de coco como matéria-prima, Freire *et al.* (2017) propuseram uma avaliação rigorosa do ciclo de vida para avaliar a real vantagem de se empregar este tipo de resíduo agroindustrial, uma vez que em muitos casos a eficiência do painel produzido e os benefícios ambientais podem não ser satisfatórios quando comparados aos produtos convencionais que contém madeira como matéria-prima.

Os estudos foram realizados com painéis do tipo *Médium Density Fibreboard* – MDF e *High Density Fibreboard* – HDF. Os pesquisadores observaram que os painéis a base de casca de coco apresentavam um alto potencial em termos de desempenho ambiental, entretanto, melhorias ainda seriam necessárias para competir com os painéis convencionais em relação a seu desempenho.

Neste sentido, Zhang e Hu (2014) estudaram painéis compósitos de partículas de origem lignocelulósica que pudessem apresentar baixo custo e alto desempenho, para isto, empregaram fibra de coco associada à palha de arroz como material de enchimento. Os autores buscaram a razão ideal entre palha e fibra para obter os melhores resultados de propriedades físico-mecânicas.

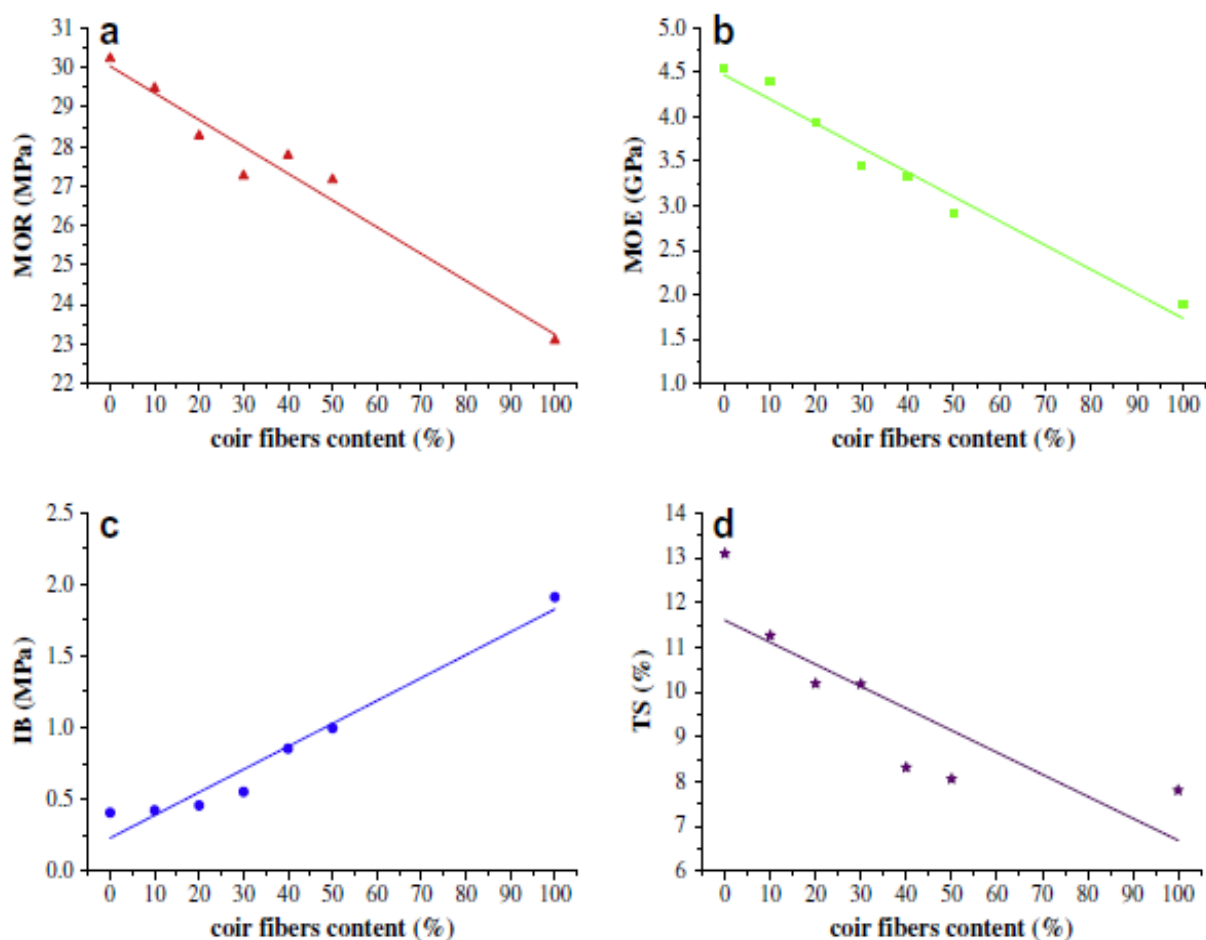
Sete tratamentos foram propostos, denominados de A a G que correspondiam respectivamente a 100% de partículas de casca de arroz e 0% de fibra de coco, 90%

e 10%, 80% e 20%, 70% e 30%, 60% e 40%, 50% e 50% e por fim 0% de casca de arroz e 100% de fibra de coco.

À medida que o conteúdo de fibra de coco aumentou de 0 a 100% os valores de MOR e MOE diminuíram significativamente em 23,62% e 58,68% respectivamente. Através de avaliação estatística os pesquisadores constataram que existia uma forte correlação significativa entre MOR e MOE e o teor de fibra de coco.

Por outro lado, o aumento no teor de fibra de coco possibilitou uma significativa melhora na propriedade mecânica de resistência interna, aumentando em 365,85% à medida que o teor de fibra de coco aumentava de 0 a 100%. Da mesma forma, o inchamento em espessura também foi favorecido com o aumento no teor de coco, resultando em uma diminuição de 40,34% no inchamento em dos painéis estudados (Figura 19).

Figura 19 – Relações lineares entre o teor de fibra de coco e: (a) Módulo de ruptura; (b) Módulo de elasticidade; (c) Adesão interna; (d) Inchamento em espessura após 24 horas.



Fonte: Zhang e Hu (2014)

Com o intuito de atenuar o emprego de madeira na produção de painéis de partículas e possibilitar uma eficiência satisfatória nas propriedades físico-mecânicas dos produtos, Fiorelli *et al.* (2019) produziram painéis de partículas de múltiplas camadas com densidades de 500 kg/m³ e 700 kg/m³. Foi empregada fibra de coco verde (80% em massa) e bagaço de cana-de-açúcar (20% em massa), separadas por camadas, com diferentes teores de resina poliuretana derivada do óleo da mamona (15% e 12%).

A caracterização da fibra de coco realizada apontou para índices de 53,71% de celulose, 13,04% de hemicelulose e 30,08% de lignina, muito próximos aos da madeira de pinus, com valores de 51,13% de celulose, 27,29% de hemicelulose e

15,10% de lignina. A semelhança entre as duas matérias-primas aponta para a possibilidade de substituição da madeira pela fonte alternativa.

Com base nos resultados obtidos, os pesquisadores concluíram que a fibra de coco e o bagaço de cana-de-açúcar podem ser empregados para produção de painéis de partículas. Observaram ainda que o emprego de fibras de menor tamanho e maior quantidade de resina aglutinante favoreceram a densificação das camadas.

Quanto aos resultados mecânicos, os painéis que continham maior densidade apresentaram maiores valores de MOR e MOE, sendo os valores de módulo de resistência de 5,89 MPa para painéis com densidade de 500 kg/m³ e 16,20 MPa para os painéis com densidade de 700 kg/m³ e de módulo de elasticidade de 650 MPa para painéis de densidade 500 kg/m³ e 1879 MPa para os de densidade de 700 kg/m³.

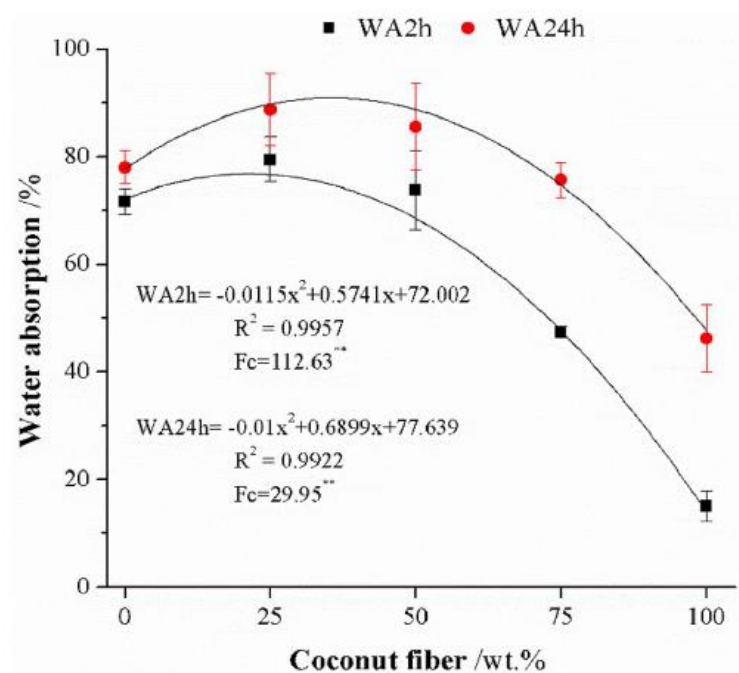
Narciso *et al.* (2020) avaliaram o potencial de utilização da casca de coco em associação a madeira de pinus para produção de painéis de partículas de média densidade. Segundo os autores, associar resíduos agrícolas à madeira para produção de painéis contribui para agregar valor ao produto, garantir o descarte adequado e promover propriedades satisfatórias aos painéis.

Foram propostos quatro tratamentos de substituição de pinus por casca de coco, nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%. Além disto, foi proposto um painel controle com 100% das partículas de pinus. Os painéis de múltiplas camadas foram padronizados a uma densidade de 650 kg/cm³ e continham como aglutinante uréia formaldeído nas proporções de 11% em massa nas camadas externas e 7% na camada interna.

Pôde-se observar que com o aumento do percentual de partículas de casca de coco na confecção dos painéis houve uma melhora nas taxas de absorção de água após 2 e 24 horas (Figura 20), por outro lado, as propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, módulo de ruptura e adesão interna foram diminuídas com o a diminuição de partículas de madeira.

No entanto, mesmo sofrendo diminuições nos valores de propriedades mecânicas, todos eles atenderam aos valores mínimos determinados pelas normas adotadas como parâmetro, o que permitiu concluir que é possível produzir painéis do tipo MDP usando apenas partículas de coco como material de enchimento.

Figura 20 - Valores médios de absorção de água em painéis do tipo MDP com partículas de pinus e de casca de coco.



Fonte: Narciso *et al.* (2020)

Owodunni *et al.* (2020) também estudaram a utilização de fibra de coco (*Cocos nucifera*) para produção de painéis de partículas. Os pesquisadores propuseram diferentes tipos de aglutinantes naturais (green adhesives) para produção dos painéis, sendo eles: amido de batata, ácido cítrico e amido de batata modificado com glutardialdeído nas proporções de 10%, 12% e 15% em relação à massa seca de partículas para cada adesivo experimentado.

A preparação da fibra de coco se deu a princípio com a secagem ao ar e eliminação de eventuais impurezas, estranhas ao estudo. Foram então expostas à secagem controlada para atingir o teor de umidade das partículas de 5%. Em seguida foram produzidos cinco painéis de fibra de coco para cada proporção de cada adesivo, totalizando, portanto, 45 painéis.

A homogeneização do particulado com cada adesivo se deu de forma manual, para em seguida serem formados os colchões de partículas com dimensão de 20,5 cm x 20,5 cm e então dispostos em prensa com pressão de 150 kg/cm² e temperatura de 145°C por um período de vinte minutos. Os painéis foram produzidos para atingirem uma densidade de 0,8 g/cm³.

O trabalho apresenta a possibilidade de produção de painéis de partículas de fibra de coco e ainda associa esta produção à utilização de adesivos alternativos aos empregados em larga escala pela indústria, como ureia formaldeído, melamina formaldeído e melamina ureia formaldeído. Conclui que a fibra de coco tem potencial para ser empregada como material alternativo às partículas de madeira apresentando produtos com valor agregado. Grande parte dos painéis produzidos atendeu aos requisitos normativos aos quais foram submetidos.

Por fim, os pesquisadores concluíram a partir dos resultados físico-mecânicos que o emprego da fibra de coco e de adesivos naturais para produção de painéis de partículas tem um impacto ambiental positivo.

Mesquita *et al.* (2016) estudaram painéis de partículas de média densidade com madeira de eucalipto associada à fibra de coco e fibra de sisal como material de enchimento, aglutinadas com ureia formaldeído (UF). Os autores produziram painéis de três camadas, sendo a camada interna (núcleo) composta pela mistura de partículas de eucalipto com as fibras de coco e sisal (em substituições de 0, 10% e 20% da madeira pelas fibras) e as duas camadas externas (faces) compostas apenas por partículas de menores dimensões de madeira de eucalipto.

Os pesquisadores observaram que os resultados físicos e mecânicos dos painéis com fibra de sisal não foram satisfatórios, entretanto, aqueles produzidos com fibra de coco alcançaram resultados semelhantes aos dos painéis produzidos apenas com madeira de eucalipto, constatando a potencialidade de uso do coco para produção de painéis. Destaca-se a propriedade física de inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água, que apresentou valores similares aos dos painéis controle que continham apenas madeira de eucalipto.

Segundo os autores, a fibra de coco tem baixas quantidades de hemicelulose e grandes quantidades de lignina. A lignina tem a capacidade de atuar como adesivo, aumentando a força de ligação da fibra e a resistência à água.

No mesmo sentido, Fiorelli, *et al.* (2012) apresentaram estudo sobre a potencialidade do uso da fibra de coco como matéria-prima para produção de painéis de partículas. As fibras coletadas foram secas até atingiram teor de umidade de cerca de 2% e 3% com comprimento médio de 7,0 milímetros.

Foram propostos painéis com densidades de 0,8 g/cm³ e 1,0 g/cm³, os pesquisadores utilizaram ureia formaldeído e resina poliuretana derivada de óleo de

mamona como agente aglutinante do material particulado, nas proporções de 10% e 15% em massa seca de fibra de coco.

Para fazer a homogeneização das partículas com as respectivas resinas foi empregado misturador planetário (argamassadeira), em seguida os colchões de partículas foram moldados e comprimidos sob pressão de 50 kg/cm² por um período de dez minutos, a uma temperatura que variou dentro de um intervalo de 100°C a 140°C. Foram produzidos três painéis para cada tratamento proposto com dimensões de 40 cm x 40 cm e 10 milímetros de espessura.

Os corpos de prova extraídos dos painéis foram avaliados de acordo com a NBR 14810 – que na ocasião tinha sua versão vigente referente ao ano de 2006 – e comparados a normas internacionais. Os resultados apontaram que os painéis com densidade de 1 g/cm³ apresentaram propriedades mecânicas suficientes para uso em aplicações construtivas civis e agrícolas inclusive estruturais.

A resina poliuretana à base de óleo de mamona apresentou melhores resultados em relação à ureia formaldeído, ocupando as lacunas entre as partículas, comprovando a viabilidade de utilização deste aglutinante para produção de painéis de fibra de coco e de partículas de madeira.

Dias (2005) realizou um estudo abrangente referente à aplicação de resina poliuretana à base de óleo de mamona para produção de painéis de madeira aglomerada e compensada. O estudo aponta as principais resinas empregadas (à base de fenol-formaldeído e ureia-formaldeído) e apresenta a PU-Mamona como alternativa, com tecnologia nacional, desenvolvida pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP.

Foram produzidos painéis compensados com madeira de *Eucalyptus saligna* e painéis de partículas (aglomerados) com *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophilla* e *Pinus elliotti*. Os painéis foram avaliados frente a ensaios físicos e mecânicos de acordo com a ABNT que apontaram para a viabilidade de emprego de PU-Mamona como adesivo alternativo.

Varanda *et al.* (2018) avaliaram o comportamento físico de painéis de partículas que tiveram como aglutinante PU-Mamona e melamina formaldeído. Os pesquisadores empregaram ainda partículas de origem lignocelulósica (casca de aveia) em associação a partículas de *Pinus elliotti*. Os resultados mostraram que painéis com menores percentuais de material particulado alternativo apresentavam

maiores densidades e com isto melhor desempenho físico em relação aos que continham maiores índices.

Entretanto, quando comparados painéis aglutinados com resina PU-Mamona àqueles que tiveram como aglutinante melamina formaldeído notou-se melhor desempenho quanto ao comportamento físico da resina derivada de óleo de mamona.

Cravo *et al.* (2017) investigaram o efeito da variação do teor de resina aglutinante e da densidade dos painéis de partículas. Foi empregada resina poliuretana derivada de óleo de mamona para aglutinação das partículas. Como material particulado, foram utilizados resíduos de sacos de cimento, colaborando com as pesquisas que buscam pelas mais variadas fontes alternativas de matéria-prima. Painéis com densidades de 0,4 g/cm³, 0,5 g/cm³ e 0,6 g/cm³ e teores de resina poliuretana de 12% e 15% em relação à massa seca das partículas foram produzidos.

As partículas alternativas foram misturadas à resina em misturador planetário por um período de três minutos, com o intuito de garantir a homogeneização dos componentes. Em seguida os painéis foram pré-moldados sob dimensões de 40 cm x 40 cm e levados à prensa com controle de temperatura e pressão (100°C e 5MPa) por dez minutos. Foram produzidos cinco painéis para cada combinação entre densidade e teor de resina PU-mamona, totalizando 30 painéis.

Os resultados apresentados mostraram que a resina aglutinante e a variação da densidade dos painéis influenciaram nos comportamentos: físico, mecânico e térmico. O estudo revelou ainda que, para alguns casos, foi possível diminuir o teor de resina de 15% para 12% sem que houvesse prejuízo às propriedades avaliadas.

Para a absorção de água, por exemplo, painéis com densidade de 0,4 g/cm³ e 0,5 g/cm³ puderam ter seus teores de resina diminuídos, já que ela não teve efeito sobre esta propriedade física. Para o inchamento em espessura, os resultados apontaram que o teor de resina poliuretana pode ser diminuído para 12% em todos os casos, independente da densidade do painel, abrindo caminho para investigações que buscam por menores teores de resina poliuretana derivada de óleo de mamona.

Neste sentido, Sugahara *et al.* (2019) estudaram a produção de painéis de partículas com 60% de partículas de madeira de eucalipto e 40% de bagaço de cana-de-açúcar aglutinados com 10% em massa de ureia formaldeído (UF) ou PU-Mamona.

Os resultados obtidos apontaram para uma melhor eficiência dos painéis produzidos com resina poliuretana derivada de óleo de mamona para todas as seguintes propriedades: Inchamento: 65,6% (UF) e 10,9% (PU-Mamona); MOR: 18 MPa (UF) e 31 MPa (PU-Mamona); MOE 2420 MPa (UF) e 3200 MPa (PU-Mamona); TP: 0,95 MPa (UF) e 2,52 MPa (PU-Mamona), mesmo sendo a densidade dos painéis produzidos com PU-Mamona 8,7% inferior à densidade dos painéis produzidos com uréia formaldeído, evidenciando a eficiência deste adesivo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

3.1.1 Obtenção da fibra de coco (*Cocos nucifera*)

A fibra de coco utilizada neste trabalho como matéria-prima para produção de painéis de partículas foi obtida através de doação da empresa Nitran Sais Produtos para Jardinagem e Horticultura, localizada na cidade de Potirendaba – SP.

Na empresa, as cascas verdes do coco são secas ao sol por alguns dias até atingirem umidade natural (12%), para em seguida serem processadas em equipamento e transformadas em fibras, resultando no produto ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Fibra de coco doada.



Fonte: Acervo do autor

A empresa produz grande quantidade de fibra diariamente e estoca em galpões, conforme ilustra a Figura 22 e o material utilizado para produção dos painéis neste trabalho foi coletado diretamente dos galpões, cerca de 0,2 m³, volume previamente calculado para produção dos painéis.

Figura 22 - Local de coleta da fibra de coco.



Fonte: Acervo do autor

3.1.2 Processamento da fibra de coco

As fibras coletadas foram transportadas até a cidade de Ilha Solteira – SP e submetidas à secagem natural por 12 horas, com auxílio de uma lona plástica preta para acelerar o processo de secagem a céu aberto (Figura 23).

Figura 23 - Fibra de coco em processo inicial de secagem.



Fonte: Acervo do autor

Após secagem natural as fibras foram depositadas em tambores plásticos para manutenção da umidade natural. A Figura 24 ilustra os tambores que foram utilizados para armazenamento da fibra de coco utilizada na pesquisa.

Figura 24 - Armazenamento da fibra de coco.



Fonte: Acervo do autor

Em seguida as fibras foram transportadas para a Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE da Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira FEIS – UNESP para processamento em moinho de facas. A Figura 25 ilustra o moinho de facas utilizado objetivando-se a produção de partículas com dimensões adequadas a serem utilizadas nas misturas para produção dos painéis.

Figura 25 - Moinho de facas.



Fonte: Acervo do autor

Durante o processo de moagem das fibras, utilizou-se uma peneira metálica com abertura de malha de 10 mm (Figura 26). A peneira foi posicionada seguindo o perímetro de rotação das facas de moagem e permitiu que o material fosse triturado até que apresentasse dimensões inferiores à sua abertura.

Figura 26 - Malha metálica.



Fonte: Acervo do autor

A Figura 27 ilustra características visuais das fibras após processo de moagem.

Figura 27 - Resultado do processamento da fibra de coco.



Fonte: Acervo do autor

3.1.3 Obtenção das madeiras de pínus e eucalipto

As madeiras (madeira serrada em forma de tábuas) de *Pinus taeda L.* e *Eucalyptus saligna* foram adquiridos em madeireiras na cidade de Ilha Solteira – SP e processadas para obtenção das partículas conforme descrito no próximo item.

3.1.4 Produção de partículas de pínus e eucalipto

As tábuas de pínus e eucalipto foram processadas num primeiro momento, na marcenaria da UNESP Campus de Ilha Solteira, por meio de uma Plaina Desengrossadeira (Figura 28), para produção de cavacos, que posteriormente foram moídos e transformados em partículas.

Figura 28 - Plaina Desengrossadeira.



Fonte: Acervo do autor

A Figura 29 ilustra os cavacos de pínus e eucalipto. Este material foi exposto à luz solar para diminuição natural da umidade, procedimento análogo ao empregado para secagem natural da fibra de coco apresentado anteriormente na Figura 23.

Figura 29 - Cavacos de madeira.



(a) Pínus



(b) Eucalipto

Fonte: Acervo do autor

Em seguida, os cavacos foram transportados para a Fazenda de Ensino e Pesquisa e Extensão – FEPE da UNESP e submetidos a moagem, conforme ilustra a Figura 30.

Figura 30 - Moagem dos cavacos de madeira em moinho de facas para produção de partículas.



(a) Pínus



(b) Eucalipto

Fonte: Acervo do autor

3.1.5 Peneiramento prévio para separação das partículas

Após a produção das partículas, todo o material produzido foi peneirado objetivando selecionar partículas na faixa entre 2 mm a 10 mm. O limite inferior do intervalo proposto se deve a intenção de eliminar ou diminuir consideravelmente a quantidade de finos que demandam maior quantidade de resina para aglutinação, devido à maior superfície específica (IWAKIRI, 2020). O intervalo superior acompanha o diâmetro de abertura da malha metálica (Figura 26). Valores próximos foram adotados por Sugahara *et al.* (2019) para partículas de Eucalipto e por Fiorelli *et al.* (2012) para fibra de coco. A Tabela 4 apresenta o conjunto de peneiras utilizado com suas respectivas aberturas de malha.

Tabela 4 - Conjunto de peneiras empregadas para separação das partículas.

Sequência das peneiras utilizadas	Nomenclatura e abertura das malhas	
	ABNT/ASTM	(mm)
1	1"	25,4
2	3/4"	19,05
3	1/2"	12,5
4	3/8"	9,52
5	1/4"	6,36
6	Nº 4	4,36
7	Nº 8	2,36
Fundo	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

O processo de peneiramento prévio das partículas foi realizado por meio de um agitador de peneiras (Figura 31). O material depositado na peneira foi vibrado por um período de 7 minutos para cada 2,5 kg de partículas. Todas as partículas retidas nas peneiras Nº8, Nº4 e 1/4", conforme apresentado na Tabela 4, foram utilizados para produção dos painéis, definindo, portanto, um intervalo para o comprimento efetivo das partículas de 2,36 mm a 9,52 mm.

Figura 31 - Conjunto de peneiras e agitador utilizado para separação prévia das partículas.



Fonte: Acervo do autor

3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

3.2.1 Teor de umidade das partículas

A fibra de coco e as partículas de madeira de pínus e de eucalipto, resultantes do processo de beneficiamento passaram por uma avaliação do teor de umidade seguindo o procedimento apresentado pela ABNT (2011). Para tanto, foi empregada equação 1 abaixo:

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U : Teor de umidade das partículas (%);

Mu : Massa úmida das partículas (g) e

Ms : Massa seca das partículas (g).

A Figura 32 a seguir apresenta amostras de fibra de coco e de partículas de pínus e eucalipto, utilizadas para a determinação do teor de umidade.

Figura 32 - Amostras utilizadas para ensaio de teor de umidade



(a) Fibra de coco



(b) Pínus



(c) Eucalipto

Fonte: Acervo do autor

3.2.2 Massa específica das partículas

A massa específica da fibra de coco e das partículas de pínus e eucalipto foi determinada por meio do método do balão volumétrico com base na ABNT (2016; 2017). Para realização do ensaio utilizou-se o picnômetro nº02 com capacidade de 500 ml, um termômetro de mercúrio (Figura 33) e uma balança de precisão.

Figura 33 – Picnômetro, termômetro e álcool absoluto utilizados para determinação da massa específica das partículas.



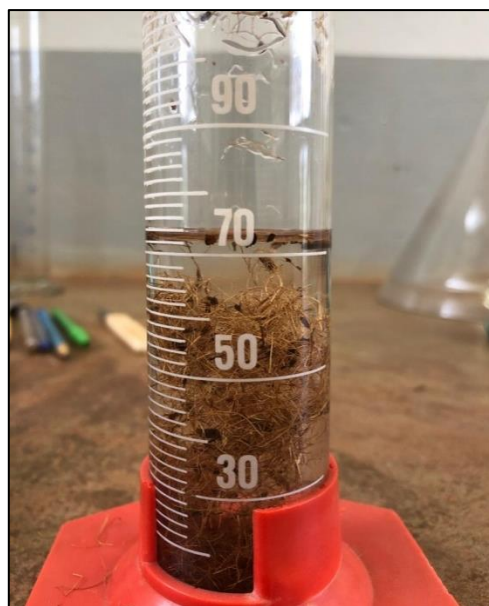
Fonte: Acervo do autor

Devido à baixa massa específica da fibra de coco, utilizou-se para realização do ensaio o álcool absoluto com concentração de 99,3% e massa específica de $0,789 \text{ g/cm}^3$ em substituição à água. A Figura 34 ilustra alguns momentos da realização do ensaio.

Figura 34 - Precipitação das partículas em álcool absoluto.



(a) Álcool



(b) Fibra de coco



(c) Pínus

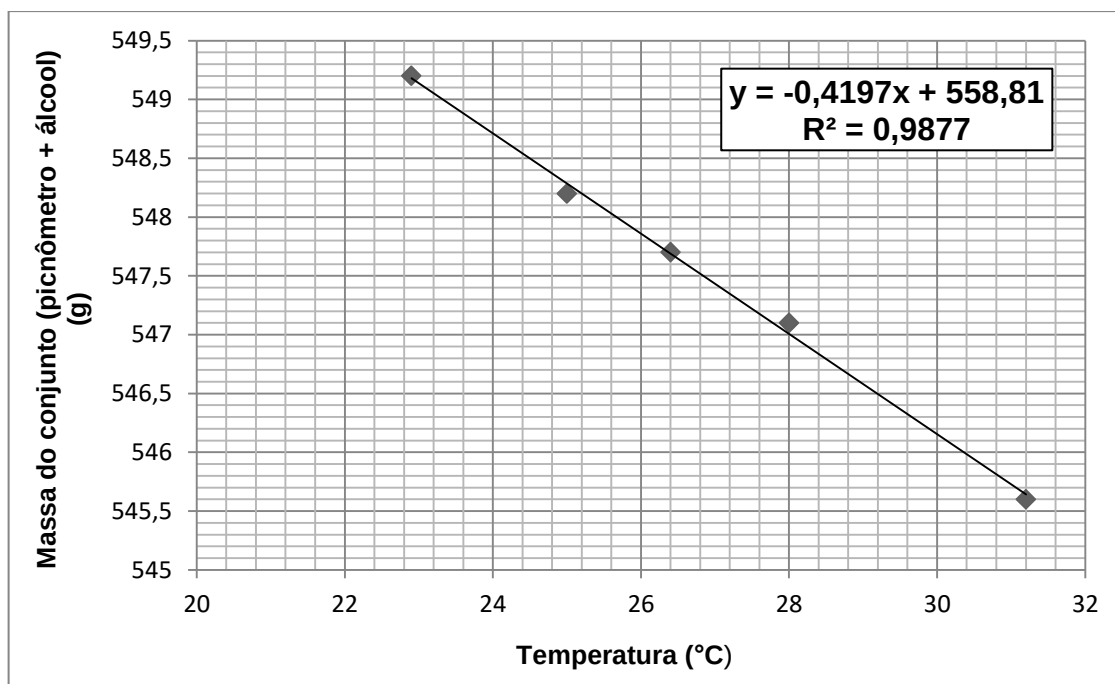


(d) Eucalipto

Fonte: Acervo do autor

Após a adoção do álcool absoluto, procedeu-se a calibração do picnômetro ao fluido escolhido. Para tanto, foram realizadas aferições da massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto) em cinco diferentes temperaturas. A Figura 35 ilustra o gráfico de dispersão formado com os valores encontrados e apresenta a equação da reta de regressão formada por eles, com um R^2 muito próximo de 1,0 denotando uma elevada confiabilidade no uso da equação de reta.

Figura 35 - Calibração do picnômetro ao álcool absoluto.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir da equação da reta definida, pôde-se dar início ao ensaio de determinação da massa específica da fibra de coco e das partículas de pinus e eucalipto por meio da equação (2).

$$\rho_s = \frac{M_s \cdot \rho_w}{M_2 - M_1 + M_s} \quad (2)$$

Onde:

ρ_s : Massa específica das partículas (g/cm³);

M_s : Massa das partículas secas em estufa (g);

ρ_w : Massa específica do álcool absoluto (g/cm³);

M_2 : Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto)(g) e

M_1 : Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto + partículas submersas) (g).

Amostras de cada uma das partículas foram introduzidas no balão volumétrico, em seguida, adicionado álcool absoluto até alcançar o nível do menisco presente na vidraria. Foi realizada a aferição da temperatura do conjunto, com auxílio do termômetro, após o equilíbrio térmico. A massa do conjunto (M_1) foi então aferida. A Figura 36 abaixo ilustra esta etapa do procedimento.

Figura 36 - Aferição da temperatura de M1.



(a) Fibra de coco



(b) Partículas de pínus



(c) Partículas de eucalipto

Fonte: Acervo do autor

A partir do valor da temperatura aferida e com o auxílio da equação da reta da Figura 35, foi obtido o valor de $M2$ para cada um dos ensaios, possibilitando o emprego da equação (2) para a determinação da massa específica de cada uma das partículas.

3.3 COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

Foram propostas três combinações distintas de mistura de partículas para a confecção dos painéis de partícula. Estas composições variam o teor de fibra de coco em relação às partículas de madeira de pínus e de eucalipto, além de estabelecerem o teor de umidade (antes da produção dos painéis) e o teor de resina poliuretana empregada como aglutinante do particulado.

As composições de partículas estudadas obedeceram as seguintes relações: a primeira composta em sua totalidade por fibra de coco (F100 P0 E0), a segunda, por 50% de fibra de coco, 25% de partículas de pínus e 25% de partículas de eucalipto (F50 P25 E25) e a última composta por 50% de partículas de pínus e 50% de partículas de eucalipto (F0 P50 E50). A Tabela 5 abaixo apresenta a proporção dos constituintes dos painéis produzidos.

Tabela 5 – Proporção de partículas, resina e teor de umidade para a produção de painéis de partículas.

Composições	Fibra de coco (%)	Partículas de pínus (%)	Partículas de eucalipto (%)	Resina poliuretana (%)	U (%)
F100 P0 E0	100	0	0	10	0 a 2
F50 P25 E25	50	25	25	10	0 a 2
F0 P50 E50	0	50	50	10	0 a 2

Fonte: Elaboração do próprio autor

O teor de umidade das partículas utilizadas na produção dos painéis foi definido com base no intervalo entre 0 a 2% determinado para as partículas. Este intervalo foi escolhido a partir da literatura científica (IWAKIRI, 2020; BAHAROGLU *et al.* 2012; OWODUNNI *et al.* 2020; ZHANG e HU, 2014; FIORELLI *et al.* 2012) e de estudos exploratórios realizados. O teor de umidade interfere no processo de cura do adesivo entre as partículas que compõem a matriz randômica, podendo promover a formação de bolhas durante a produção dos painéis e consequentemente prejudicando suas propriedades.

O teor de resina poliuretana empregada na aglutinação das partículas foi fixado em 10% com referência à massa seca das partículas, dentro do intervalo recomendado para produção de painéis de partículas: entre 6% e 12% (IWAKIRI, 2020) e em acordo com a metodologia apresentada por Gilio *et al.* (2021), Trevisan *et al.* (2021) e Sugahara *et al.* (2019).

A utilização de partículas de madeira de pínus e de eucalipto se deu, por serem estas, as duas espécies mais frequentes (96,3%) em florestas plantadas no território nacional (SNIF, 2019), além de serem as madeiras mais empregadas para produção de painéis no Brasil (IWAKIRI, 2020; IBÁ, 2020) e extremamente difundidas na literatura científica (SANTOS *et al.* 2021; SUGAHARA *et al.* 2019; MENDES *et al.* 2010; ÇOLAK *et al.* 2005; CARNEIRO *et al.* 2004; VANNIEKERK *et al.* 1994).

Vale ressaltar que cada espécie de madeira apresenta características próprias que influenciam nas propriedades dos painéis e que se correlacionam. A densidade da madeira, por exemplo, influi na razão de compactação e os teores de celulose, hemicelulose e lignina influem na aglutinação das partículas e em todas as demais propriedades dos painéis.

A celulose confere integridade estrutural à madeira devido ao seu justo acomodamento e estrutura hierárquica. A diminuição dos teores de celulose poderá propiciar uma diminuição das propriedades mecânicas dos painéis (MARCUS, 2020).

Após a homogeneização das partículas, seguindo as composições da Tabela 5, o ensaio de massa específica das partículas, descrito no item 4.2.2, foi novamente realizado, com o objetivo de determinar a massa específica de cada mistura e, conseqüentemente, servir de referência para o cálculo da razão de compactação dos painéis produzidos.

3.3.1 Determinação da composição granulométrica das misturas

Para a determinação da granulometria das partículas das misturas utilizou-se o documento normativo da ABNT (1997b; 2003), cujas normas técnicas para realização dos ensaios foram adaptadas por serem empregadas para caracterização da composição granulométricas de solos, que possuem partículas esféricas, conseqüentemente, para as partículas de fibra de coco, pinus e eucalipto, considerou-se a realização do ensaio com maior período de tempo de agitação para um volume com menor massa de material.

A Tabela 6 apresenta a relação das peneiras utilizadas com suas respectivas aberturas das malhas em milímetros.

Tabela 6 - Conjunto de peneiras empregadas no ensaio para determinação da composição granulométrica das misturas de partículas.

Sequência de peneiras utilizadas	Nomenclatura e abertura das malhas	
	ABNT/ASTM	(mm)
1.	1/4"	6,3
2.	4	4,75
3.	8	2,36
4.	16	1,19
5.	30	0,59
6.	50	0,29
7.	100	0,15
fundo	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

A vibração do conjunto de peneiras se deu com o auxílio de um agitador de peneiras (Figura 37). Adotou-se um tempo de agitação de 15 minutos para cada 35 gramas de partículas secas em estufa por um período de 24 horas através de ensaios empíricos.

Figura 37 - Conjunto e agitador de peneiras, utilizados no ensaio granulométrico.



Fonte: Acervo do autor

As amostras das composições ensaiadas foram obtidas por meio de quarteamento do volume total de material, seguindo as prescrições da ABNT (2009). A Figura 38 ilustra o quarteamento. O método de quarteamento foi empregado até que se obtivesse a massa de 35 gramas de partículas. A Figura 39 ilustra o momento da aferição da massa do material utilizado para realização do ensaio.

Figura 38- Exemplo de quarteamento de partículas.



Fonte: Acervo do autor

Figura 39 - Procedimento: obtenção das 35 gramas de partículas.



Fonte: Acervo do autor

3.3.2 Correção da umidade das partículas das composições

As composições de partículas foram submetidas à correção de umidade com o intuito de conferir às partículas o teor de umidade proposto (entre 0 e 2%).

Foram produzidos nove painéis, sendo três para cada composição de mistura estudada (Tabela 5). Inicialmente, três amostras de cada composição: (F100 P0 E0; F50 P25 E 25; F0 P50 E 50) foram ensaiadas quanto ao teor de umidade de acordo com a equação (1). A Figura 40 apresenta o conjunto das amostras ensaiadas.

Figura 40 - Amostras utilizadas para determinação do teor de umidade das composições propostas na Tabela 5.



Fonte: Acervo do autor

A partir de então, o teor de umidade das partículas utilizadas para produção dos painéis foi sendo ajustado por meio de secagem em estufa, após a etapa inicial de secagem por exposição ao Sol, até atingirem teor de umidade entre 0 a 2%.

3.4 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE PARTÍCULA HOMOGÊNEOS

3.4.1 Cálculo da massa das partículas

Para calcular a massa dos painéis é necessário definir uma densidade e o volume dos painéis, consequentemente, foi considerada uma densidade nominal de 0,55 g/cm³, utilizada para determinar a razão de compactação (relação entre a densidade do painel e a densidade aparente das partículas). Vale ressaltar que de acordo com a ABNT (2018) os painéis de média densidade devem ser produzidos entre 0,551 a 0,750 g/cm³.

O volume dos painéis foi definido em função de uma formadora de colchão de partículas que possibilita a produção dos painéis com dimensões de 35 cm x 35 cm x 1,0 cm, ou seja, volume igual a 1225 cm³.

A partir da densidade nominal e do volume previamente estabelecido para produção dos painéis, foi possível calcular a massa de partículas utilizando-se a equação 4 a seguir.

$$Mp = Dp.Vp \quad (4)$$

Onde:

Dp : Densidade nominal do painel (g/cm³);

Mp : Massa de partículas (g) e

Vp : Volume do painel (cm³).

3.4.2 Adição do adesivo às partículas e homogeneização

Após determinar a massa de partículas para a produção dos painéis, adicionou-se o adesivo, que se constituiu da resina poliuretana bi componente

derivada do óleo de mamona (PU-Mamona), empregada na proporção de 10% da massa seca das partículas.

Foram produzidos três painéis para cada composição (Tabela 5), totalizando nove painéis e em seguida, submetidos a avaliações de acordo os documentos normativos: ABNT (2013; 2018) e ANSI (1999).

Para misturar o poliuretano bi componente (poliol e pré-polímero) derivado do óleo de mamona (PU-Mamona), adicionou-se manualmente às partículas o poliol para em seguida realizar a homogeneização utilizando-se uma betoneira. Este mesmo procedimento foi empregado para homogeneização do pré-polímero às partículas.

A Figura 41 ilustra a sequência de homogeneização do PU-Mamona às partículas.

Figura 41 - Adição e homogeneização da PU-Mamona.



(a)

Adição manual
de poliol



(b)

Adição manual
de pré-polímero



(c)

Homogeneização
por meio de betoneira

Fonte: Acervo do autor

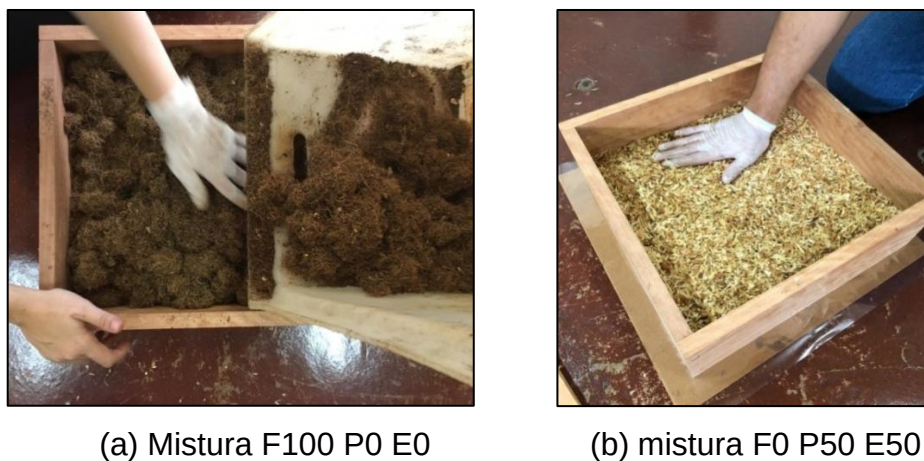
Observa-se que a fibra de coco apresentou maior dificuldade em relação às partículas de madeira para homogeneização com a resina por conta da constituição fibrosa. Após homogeneização da PU-Mamona às partículas, o material foi encaminhado para preparação do colchão de partículas e em seguida prensagem para produção dos painéis.

3.4.3 Preparação do colchão de partículas

A formação do colchão de partículas é a etapa seguinte à homogeneização do adesivo, que se constitui em depositar as partículas “encoladas” no interior de uma caixa (formadora de colchão) nas dimensões de 35 x 35 x 15 cm, sem tampa e fundo fixos, conforme ilustrado na Figura 42.

Na parte inferior da formadora de colchão é colocado fundo removível com dimensões de 45 x 45 cm e espessura que possibilite suportar o peso das partículas e da formadora para que seja possível o transporte até a prensa. Antes de depositar as partículas no interior da formadora é necessário cobrir o fundo falso com um filme plástico de poliéster para evitar a aderência do painel entre as chapas metálicas da prensa aquecida. A Figura 42 ilustra a sequência para preparação do colchão de partículas.

Figura 42 - Preparação do colchão de partículas com misturas propostas (Tabela 5) para produção dos painéis.



Fonte: Acervo do autor

Para que ocorra a formação do colchão, as partículas “encoladas” e depositadas no interior da formadora de colchão precisam ser acomodadas e submetidas a uma leve compactação prévia a frio, esse processo propicia a diminuição dos espaços de vazios entre as partículas e facilita a compactação do painel na prensa com controle de temperatura e pressão. A Figura 43 ilustra o

colchão de partículas no interior da formadora após ser submetido à prensagem a frio.

Figura 43 – Colchão de partículas previamente compactado a frio ilustrando dois tipos de misturas.



(a) Mistura F100 P0 E0



(b) Mistura F0 P50 E50

Fonte: Acervo do autor

3.4.4 Prensagem com controle de temperatura

Após preparação do colchão de partículas, o conjunto formador de colchão foi transportado para a prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão. A Figura 44 ilustra o conjunto depositado na prensa e as etapas que antecedem a prensagem.

Figura 44 - Conjunto formadora de colchão de partículas depositado na prensa hidráulica com controle de temperatura e pressão.



(a)

Posicionamento do conjunto na prensa e



(b)

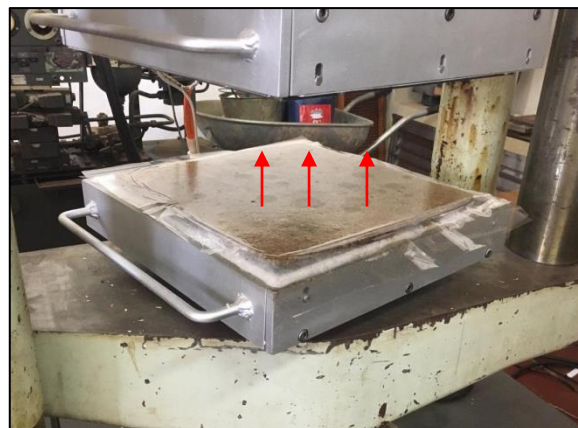
Remoção da fôrma e da tampa

retirada do fundo móvel



(c)

Adição do filme plástico na superfície do colchão de partículas



(d)

Levantamento da parte superior da prensa após compactação do painel

Fonte: Acervo do autor

Imediatamente após a prensagem, os painéis foram retirados da prensa e foi removido o filme plástico com o painel ainda quente com o intuito de facilitar a cura do adesivo e evitar a adesão do filme nas superfícies do painel. A Figura 45 ilustra a remoção do filme plástico.

Figura 45 - Remoção do filme plástico das superfícies do painel.



Fonte: Acervo do autor

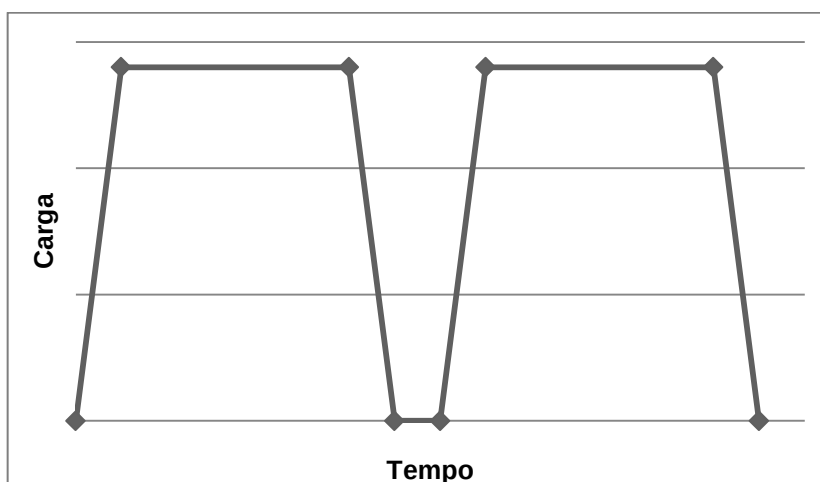
Durante o processo de prensagem todos os painéis foram submetidos a uma pressão em torno de 70 tf, que equivale a uma pressão de cerca de 570 N/cm^2 , previamente calculado em função da área do painel.

O tempo total considerado para produção dos painéis foi de 10 minutos e 30 segundos, sendo dividido em dois ciclos de prensagem de 5 minutos, separados por um intervalo de alívio das tensões de 30 segundos. A Figura 46 ilustra o esquema do ciclo de prensagem.

O alívio das tensões por 30 segundos objetivou evitar concentração de gases formados no processo de prensagem devido ao calor, contribuindo para evitar a formação de bolhas no painel (CAMPOS e LAHR, 2004).

Os painéis produzidos foram mantidos por 72 horas sobre uma superfície plana e sob um peso uniformemente distribuído para que não houvesse empenamento durante o processo de cura.

Figura 46 - Esquema do ciclo de prensagem.



Fonte: Elaboração do próprio autor

3.4.5 Preparação dos corpos de prova

Decorridas às 72 horas para finalização da cura dos painéis, iniciou-se o processo de preparação dos corpos de prova removendo-se inicialmente as bordas do painel. Em seguida, conforme orientação da ABNT (2018) os painéis foram esquadrejados de acordo com as medidas dos corpos de prova (CP).

Considerando-se que são três painéis de cada mistura, foram extraídos 4 CP's de cada painel totalizando 12 CP's para cada ensaio para caracterização das propriedades físicas e mecânicas. Vale ressaltar que o documento normativo define no mínimo 10 CP's para cada ensaio.

3.5 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos foram realizados considerando-se as orientações contidas na ABNT (2018). A seguir serão descritas as propriedades físicas avaliadas de acordo com a referida norma.

3.5.1 Densidade (D)

Para o cálculo da densidade, foram utilizados doze corpos de prova para cada composição com dimensões de 50 mm x 50 mm. Inicialmente foram feitas aferições da massa de cada exemplar em balança (precisão de 0,01g), em seguida, foram realizadas as marcações das diagonais nos CP's conforme orientação contida no Anexo - G da ABNT (2018) para aferição das medidas (Figura 47).

Figura 47 - Corpo de prova utilizado para realização do ensaio de densidade.



Fonte: Acervo do autor

A partir das diagonais feitas nos CP's, foram realizadas as aferições das dimensões quanto à largura das arestas, e a espessura do corpo de prova. A espessura foi aferida empregando-se um micrometro (precisão de 0,001mm) no ponto de intersecção das diagonais. A largura das arestas foi aferida utilizando-se um paquímetro com precisão de 0,1 mm (Figura 48).

Figura 48 - Aferição das dimensões dos CP's.



(a)

Aferição da espessura



(b)

Aferição da largura e comprimento

Fonte: Acervo do autor

De posse da massa dos CP's e do volume previamente calculado através de suas dimensões, calculou-se a densidade de cada corpo de prova de acordo com as equações (5) e (6) a seguir:

$$D_{cp} = \frac{M_{cp}}{V_{cp}} \times 1.000.000 \quad (5)$$

Sendo:

$$V_{cp} = b_1 \times b_2 \times e \quad (6)$$

Onde:

D_{cp} : densidade do corpo de prova (kg/m³);

M_{cp} : massa do corpo de prova (g);

V_{cp} : volume do corpo de prova (mm³);

b_1 e b_2 : são as dimensões das arestas dos corpos de prova (mm) e

e : espessura do corpo de prova (mm).

Com os valores de densidade de cada corpo de prova procedeu-se o cálculo da média aritmética para determinação da densidade média dos painéis de cada composição. Por fim, com auxílio da equação (7) foi calculada a variação percentual da densidade de cada CP em relação à densidade média.

$$D\% = \frac{D - D_{média}}{D_{média}} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

$D\%$: variação percentual da densidade e

$D_{média}$: densidade média da composição (kg/m^3);

3.5.2 Teor de umidade (U)

Para determinação do teor de umidade dos painéis das diferentes composições foram utilizados doze CP's com dimensões de 50 mm x 50 mm e com base no Anexo - F da ABNT (2018), inicialmente determinou-se a massa úmida de cada CP utilizando-se uma balança com precisão de 0,01g.

Em seguida, os CP's foram secos em estufa à temperatura de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ até a obtenção de massa constante. Após a secagem e esfriamento foi aferida a massa de cada CP.

A Figura 49 ilustra a aferição da massa de um CP após secagem em estufa utilizando-se uma balança digital com precisão de 0,01g.

Figura 49 - Aferição da massa seca de um CP.



Fonte: Acervo do autor

Para determinação do teor de umidade dos painéis empregou-se a Equação 1 que é a mesma equação utilizada para determinação do teor de umidade das partículas descrito anteriormente no item 4.2.1.

3.5.3 Inchamento após 24 horas (I)

Para a determinação do inchamento após 24 horas dos corpos de prova dos painéis de cada composição foram utilizados doze CP's com dimensões de 50 mm x 50 mm e de acordo com o Anexo - L da ABNT (2018), inicialmente, aferiu-se a espessura dos CP's com o auxílio de um micrômetro, como ilustrado anteriormente na Figura 48.

A Figura 50 ilustra a realização do ensaio onde verificam-se os CP's submersos em água deionizada e dispostos sob uma malha metálica para garantir que o nível da água permanecesse cerca de 25 mm da face superior dos CP's.

Figura 50 - Corpos de prova dispostos sob malha metálica.



Fonte: Acervo do autor

Ressalta-se que os CP's ficaram submersos durante 24h sob temperatura de 20°C até que fossem retirados para aferição de suas espessuras. A equação (8) a seguir foi empregada para cálculo do inchamento.

$$I = \frac{E1 - E0}{E0} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

I: Inchamento em espessura do corpo de prova (%);

E1: Espessura do corpo de prova após o período de 24 horas de imersão (mm) e

E0: Espessura do corpo de prova antes da imersão (mm).

3.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram realizados no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural – NEPAE, no Campus central da FEIS – UNESP. Foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC GR048 com capacidade de carga de 300 kN.

Para a determinação do Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) foram utilizados 12 CP's de cada composição com

dimensões de $(20 \times E + 50)$ mm x 50 mm, sendo E a espessura do CP em milímetros, de acordo com o Anexo - K da ABNT (2018). A Figura 51 ilustra aspectos gerais dos CP's ensaiados com 100% de fibra de coco e umidade das partículas entre 0% e 2% e teor de resina de 10% em massa seca de partículas.

Figura 51 – Corpos de prova utilizados para realização dos ensaios de MOR e MOE da composição F100 P0 E0.



Fonte: Acervo do autor

Para realização dos ensaios foi aferida a largura dos CP's com auxílio de um paquímetro e em seguida a espessura em três diferentes pontos, considerado a média aritmética dos valores obtidos. A Figura 52 ilustra os procedimentos para determinação das medidas dos CP's.

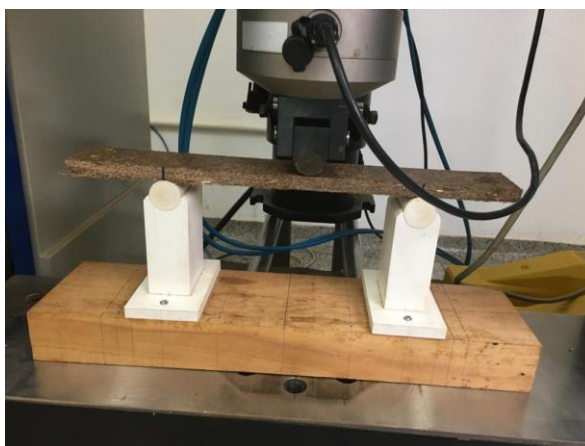
Figura 52 - Aferição das dimensões dos CP's.



Fonte: Acervo do autor

A Figura 53 ilustra o momento da realização do ensaio para avaliação da resistência do MOR e MOE, vale ressaltar que para realização desse ensaio deve ser considerado o comprimento do vão de vinte vezes a espessura do CP e a aplicação de carga pontual coincidente com o meio do CP e do vão. A ruptura dos corpos de prova ocorreu dentro do intervalo de 60 ± 30 segundos do início do ensaio.

Figura 53 - Corpo de prova da composição F100 P0 E0 em ensaio de flexão.



Fonte: Acervo do autor

3.6.1 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR)

A partir do ensaio de flexão foi calculada a resistência à flexão estática de acordo com a equação (9) a seguir:

$$MOR = \frac{1,5 (P \times Da)}{B \times (E)^2} \quad (9)$$

Onde:

MOR : Módulo de resistência à flexão estática (N/mm²);

P: Carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

Da: Distância entre os apoios (mm);

B: Largura do corpo de prova (mm) e

E: Espessura do corpo de prova (mm).

O resultado obtido no ensaio foi a média aritmética dos valores de MOR obtidos para cada corpo de prova de cada composição, com precisão de 1 N/mm².

3.6.2 Módulo de Elasticidade (MOE)

O módulo de elasticidade dos corpos de prova foi calculado de acordo com a equação (10) a seguir:

$$MOE = \frac{P1 \times (Da)^3}{d \times 4 \times B \times (E)^3} \quad (10)$$

Onde:

MOE: Módulo de elasticidade (N/mm²);

P1: Carga no limite proporcional, lida no indicador de cargas (N);

Da: Distância entre os apoios do aparelho (mm);

d: Deflexão correspondente à carga *P1* (mm);

B: Largura do corpo de prova (mm) e

E: Espessura do corpo de prova (mm).

O resultado obtido no ensaio foi a média aritmética dos valores de MOE obtidos para cada corpo de prova de cada composição, com precisão de 10 N/mm².

3.6.3 Resistência à Tração Perpendicular (TP)

Para o cálculo da resistência à tração perpendicular, também denominada adesão interna segundo a ABNT (2018), utilizou-se doze CP's para cada conjunto de painéis com dimensões de 50 mm x 50 mm.

Inicialmente as superfícies dos CP's foram regularizadas por meio da lixadeira apresentada na Figura 54, com o objetivo de propiciar melhor adesão as superfícies dos suportes metálicos e dos CP's e em seguida foram aferidas suas dimensões, de acordo com as orientações contidas no Anexo J da ABNT (2018).

Para o lixamento dos CP's foi utilizada lixa para madeira com grão 60 e o equipamento ilustrado na Figura 54.

Figura 54 - Lixadeira empregada na regularização das superfícies dos CP's.



Fonte: acervo do autor

A Figura 55 ilustra o processo de fixação dos CP's nos suportes metálicos que foram lixados e desengordurados para propiciar melhor adesão aos CP's empregando-se o adesivo instantâneo Loctite 496 e, para garantir a cura completa do adesivo o conjunto de CP's e suportes metálicos foram pressionados utilizando-se pinças por período de 24h.

Figura 55 – Preparação do conjunto CP's e suportes metálicos para realização do ensaio de Tração Perpendicular.



(a)

Corpo de prova preparado para ser colado aos suportes metálicos



(b)

Suportes metálicos preparados para serem colados nos CP's



(c)

Pinça utilizada para pressionar o conjunto suporte metálicos e CP

Fonte: acervo do autor

Após preparação dos CP's, foi realizado o ensaio para avaliação da Resistência à Tração Perpendicular dos painéis. A Figura 56 ilustra a máquina universal de ensaios e um CP no aparato de ensaio após ruptura.

Figura 56 – Aspectos gerais da realização do ensaio de Tração Perpendicular



(a)

Máquina universal de ensaios EMIC utilizada para realização do ensaio



(b)

Aparato para ensaio de Tração Perpendicular

Fonte: acervo do autor

A ruptura dos CP's ocorreu dentro do intervalo de 60 ± 30 segundos do início do ensaio. O cálculo da resistência à tração perpendicular dos CP's foi realizado de acordo com as equações (11) e (12) a seguir:

$$TP = \frac{P}{S} \quad (11)$$

Sendo:

$$S = b1 \times b2 \quad (12)$$

Onde:

TP : Resistência à tração perpendicular (N/mm^2);

P : Carga de ruptura (N);

S : Área da superfície do corpo de prova (mm^2) e

*b*1 e *b*2: Dimensões do corpo de prova (mm).

3.7 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS

O teste de contraste de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para verificar a influência das composições entre fibra de coco e partículas de madeiras de pinus e de eucalipto nos painéis produzidos, sendo essas composições iguais a 100% de fibra de coco (F100 P0 E0), 50% de fibra de coco e 25% de partículas de madeira de pinus e 25% de madeira de eucalipto (F50 P25 E25) e 50% de partículas de madeira de pinus e 50% de madeira de eucalipto (F0 P50 E50).

Do teste de Tukey, (A) denota o grupo associado ao maior valor médio da propriedade investigada, (B) o grupo com o segundo maior valor médio e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em composições distintas com médias estatisticamente equivalentes.

O teste de Anderson-Darling assim como o teste de Comparações Múltiplas, ambos também avaliados ao nível de 5% de significância, foram utilizados para verificação da normalidade e da igualdade de variâncias, premissas essas a serem testadas para validação dos resultados obtidos do teste de Tukey. Pela formulação de ambos os testes, valor-p (probabilidade p) maior ou igual ao nível de significância implica na normalidade e na equivalência das variâncias, e na não normalidade e na não equivalência das variâncias em caso contrário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram analisados com base nas classificações dos documentos normativos propostos (ABNT, 2018 e ANSI, 1999) descritos no item 3.2.6 da revisão de literatura.

4.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

4.1.1 Teor de umidade das partículas

Os teores de umidade médios determinados para as partículas que foram utilizadas para produção dos painéis estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Teor de umidade da fibra de coco e das partículas de pínus e eucalipto.

Partículas	Teor de umidade (%)
Fibra de coco	1,64
Pínus	4,23
Eucalipto	6,63

Fonte: Elaboração do próprio autor

Verifica-se que a fibra de coco apresentou teor de umidade menor em relação às partículas de pínus e eucalipto, nas mesmas condições de exposição à temperatura e umidade do ar. Segundo Narciso *et al.* (2020) este comportamento é bastante conhecido em fibras de origem lignocelulósicas, por apresentarem composição química altamente hidrofílica. Vale ressaltar que, considerando-se as características do PU-Mamona, quanto menor o teor de umidade das partículas mais eficiente será a adesão, conseqüentemente, previu-se um intervalo de umidade das partículas entre 0 a 2%.

Os teores de umidade das três espécies estudadas individualmente (Coco nucifera, *Pinus taeda L.* e *Eucalyptus saligna*), após exposição ao Sol por 12 horas, apresentaram valores próximos ao intervalo proposto para as misturas (0 a 2%).

A obtenção de teores de umidade próximos aos desejados, somente com a exposição ao Sol é uma vantagem com relação ao uso desses materiais, em especial da fibra de coco. Isto porque, apenas com a secagem natural a fibra de coco atingiu o intervalo de teor de umidade proposto (entre 0 e 2%) diminuindo, com isto, o tempo de utilização de equipamentos com emprego de energia elétrica para a diminuição artificial do teor de umidade, resultando em economia de energia.

4.1.2 Massa específica das partículas

As massas específicas da fibra de coco, das partículas de pínus e eucalipto e das composições entre elas, obtidas por meio da equação (2), são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa específica da fibra de coco, das partículas de pínus e eucalipto e das composições propostas.

Partículas isoladas	$M1$ (g)	T °C	$M2$ (g)	M_s (g)	ρ_s (g/cm ³)
Fibra de coco	544,3	32,0	545,38	2,7	0,5636
Pínus	545,0	31,0	545,8	3,3	0,6350
Eucalipto	546,9	31,5	545,59	8,5	0,9328
Composições (misturas de partículas)	$M1$ (g)	T °C	$M2$ (g)	M_s (g)	ρ_s (g/cm ³)
F100 P0 E0	544,3	32,0	545,38	2,7	0,5636
F50 P25 E25	545,2	29,1	546,59	6,92	0,6564
F0 P50 E50	545,4	29,8	546,30	12,81	0,7370

Fonte: Elaboração do próprio autor

A massa seca (M_s) foi adotada a partir de um volume de partículas suficiente para realização do ensaio obtido através de estudos preliminares realizados. Os resultados de massa específica definiram que a fibra de coco é menos densa em relação às partículas de pínus e eucalipto. Este parâmetro pode influenciar na densidade final dos painéis e estabelece relação direta com a razão de compactação (IWAKIRI 2020).

De acordo com Iwakiri (2020) a escolha da matéria-prima é parte relevante do estudo de painéis de partículas, pois, denota a qualidade do produto final. Dentre os requisitos básicos para a escolha, a baixa densidade se destaca, uma vez que contribui para a diminuição da razão de compactação (relação entre a densidade do painel e a densidade da madeira) que deve ser de pelo menos 1,3 para que haja a densificação necessária para produção do painel.

4.1.3 Determinação granulométrica

Conforme descrito no Capítulo Materiais e Métodos os ensaios para determinação granulométrica foram realizados com três repetições para cada mistura de partículas. A massa média retida é acompanhada de seu coeficiente de

variação. Este método foi adotado com o intuito de aumentar a confiabilidade dos resultados aferidos.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados do ensaio da composição F100P0 E0. Os resultados referentes às composições F50 P25 E25 e F0 P50 E50 são expressos respectivamente nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 9 - Ensaio granulométrico da composição F100P0 E0.

Peneira	Abertura (mm)	ABNT e ASTM	Massa média retida (g)	CV (%)	Retido (%)	Massa acumulada (g)	(%) Retido e acumulado
1	6,3	1/4"	1,63	12,61	4,66	1,63	4,66
2	4,75	4	1,67	7,47	4,78	3,30	9,44
3	2,36	8	2,30	16,01	6,58	5,60	16,01
4	1,19	16	3,97	8,31	11,35	9,57	27,37
5	0,59	30	5,00	5,89	14,30	14,47	41,66
6	0,29	50	8,13	1,53	23,35	22,70	64,91
7	0,15	100	10,70	0,76	30,60	33,40	95,51
Fundo	-	-	1,57	6,01	4,49	34,97	100
Total	-	-	34,97	-	100,01	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 10 - Ensaio granulométrico da composição F50 P25 E25.

Peneira	Abertura (mm)	ABNT e ASTM	Massa média retida (g)	CV (%)	(%) Retido	Massa acumulada (g)	(%) Retido e acumulado
1	6,3	1/4"	0,87	5,42	2,49	0,87	2,49
2	4,75	4	1,30	6,28	3,72	2,17	6,21
3	2,36	8	12,63	2,61	36,15	14,8	42,36
4	1,19	16	7,87	4,19	22,52	22,67	64,88
5	0,59	30	2,83	6,66	8,1	25,5	72,98
6	0,29	50	3,87	3,22	11,08	29,37	84,06
7	0,15	100	4,57	3,71	13,08	33,94	97,14
Fundo	-	-	1,00	8,17	2,86	34,94	100
Total	-	-	34,94	-	100	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 11 - Ensaio granulométrico da composição F0P50 E50.

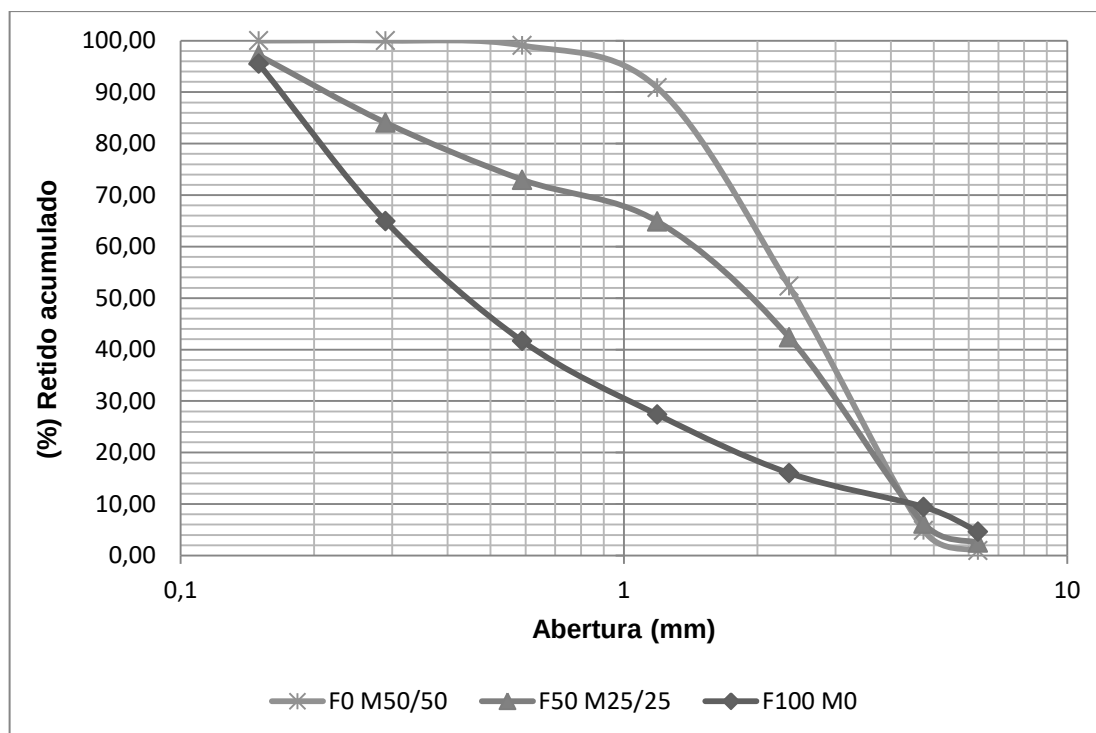
Peneira	Abertura (mm)	ABNT e ASTM	Massa média retida (g)	CV (%)	(%) Retido	Massa acumulada (g)	(%) Retido e acumulado
1	6,3	1/4"	0,33	37,79	0,94	0,33	0,94
2	4,75	4	1,37	9,10	3,92	1,70	4,87
3	2,36	8	16,57	0,75	47,42	18,27	52,29
4	1,19	16	13,47	0,70	38,55	31,74	90,84
5	0,59	30	2,87	3,28	8,21	34,61	99,06
6	0,29	50	0,33	14,28	0,94	34,94	100
7	0,15	100	0	-	0	34,94	100
Fundo	-	-	0	-	0	34,94	100
Total	-	-	34,94	-	99,98	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com os resultados obtidos nos ensaios de composição granulométrica, foram traçadas as curvas granulométricas a partir da correlação entre o percentual retido acumulado e a abertura das malhas das peneiras. A Figura 57 ilustra a sobreposição das curvas granulométricas das composições.

Com a análise das curvas granulométricas é possível observar que as composições seguem um comportamento que varia de acordo com o módulo de finura das partículas ensaiadas. A composição F100P0 M0 apresentou o menor módulo de finura (2,59), enquanto a composição F0 P50 E50 apresentou o maior módulo (4,48). A composição F50 P25 E25 apresentou um valor de módulo de finura intermediário (3,70).

Figura 57 - Curva granulométrica das composições de partículas propostas.



Fonte: Elaboração do próprio autor

4.2 ENSAIOS FÍSICOS

4.2.1 Densidade (D)

A partir dos procedimentos de ensaio apresentados no Capítulo Materiais e Métodos, foram avaliadas as densidades dos 12 corpos de prova extraídos dos três painéis de cada composição.

A Tabela 12 apresenta os valores de densidades médias obtidas com os ensaios realizados, seu coeficiente de variação e a maior variação percentual da densidade (D%), com precisão de 1%, como base na orientação normativa (ABNT, 2018).

Tabela 12- Densidade média das composições

Composições	D média (g/cm ³)	CV (%)	D (%)
F100P0 E0	0,75	2,09	4
F50 P25 E25	0,85	1,53	2
F0P50 E50	0,97	1,38	2

Fonte: Elaboração do próprio autor

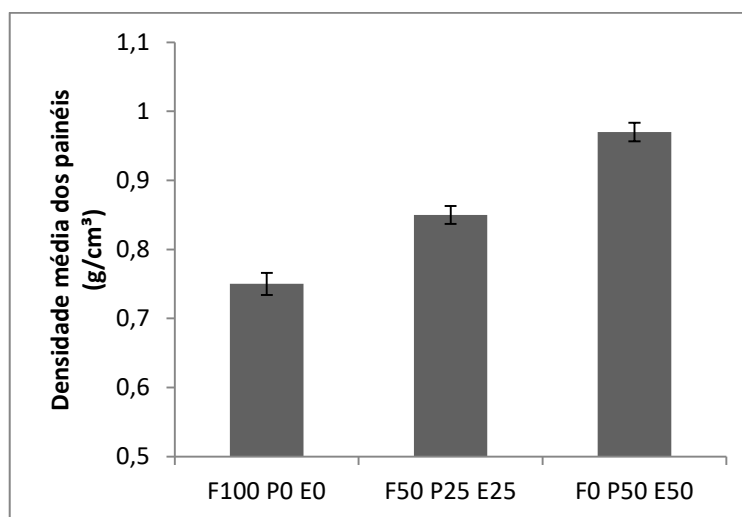
A ABNT (2018) estabelece que o módulo máximo de variação percentual da densidade deva ser de 7%. Todas as composições estudadas apresentaram densidades que atenderam a este critério normativo.

A baixa variação da densidade pode estar relacionada à baixa presença de bolhas (gás carbônico) no processo de cura dos painéis, devido ao baixo teor de umidade das partículas (entre 0 e 2%) resultando em uma melhor adesão e recobrimento das partículas pela resina PU-Mamona, contribuindo para uma melhor densificação e comportamento físico-mecânico.

As composições F50 P25 E25 e F0 P50 E50 apresentaram valores de densidade superiores aos propostos para produção de painéis de média densidade pela ABNT (2018), ou seja, entre 0,551 a 0,750 g/cm³ e ANSI (1999) que é entre 0,640 e 0,800 g/cm³. Entretanto, os painéis da composição que continha apenas fibra de coco (F100 P0 E0) se enquadraram em ambos os documentos normativos como painel de média densidade.

A Figura 58 ilustra os valores de densidade média apresentados na Tabela 12 para cada composição. O desvio padrão das médias é apresentado.

Figura 58 - Densidade média das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Observa-se que a densidade dos painéis aumenta com a diminuição gradual do teor de fibra de coco nas composições. Relacionando-se a densidade média dos painéis produzidos à massa específica das composições de partícula (ρ_s) apresentada na Tabela 8, obtêm-se a razão de compactação (Tabela 13).

Tabela 13- Razão de compactação das composições estudadas

Composição	D média do painel (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³) mistura	Razão de compactação
F100 P0 E0	0,75	0,5636	1,33
F50 P25 E25	0,85	0,6564	1,29
F0P50 E50	0,97	0,7370	1,32

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os valores da razão de compactação dos painéis das composições F100 P0 E0 e F0 P50 E50 atenderam ao valor mínimo 1,3, contudo, observa-se na Tabela 13 que os painéis da composição F50 P25 E25 apresentaram valor da razão de compactação de 1,29, ou seja, muito próximo do valor mínimo. A Figura 59 a seguir apresenta alguns dos CP's utilizados no ensaio de densidade.

Figura 59 - Aspectos gerais de CP's utilizados para aferição da densidade dos painéis e suas respectivas composições.



Fonte: Acervo do autor

4.3.2 Teor de Umidade (U)

Os teores de umidade apresentados na Tabela 14 correspondem à média dos teores de umidade dos CP's ensaiados para os painéis de cada uma das composições propostas.

Tabela 14 - Teor de Umidade dos painéis

Composição	U valor médio (%)	CV (%)
F100 P0 E0	9,37	4,31
F50 P25 E25	8,75	2,55
F0 P50 E50	8,31	2,28

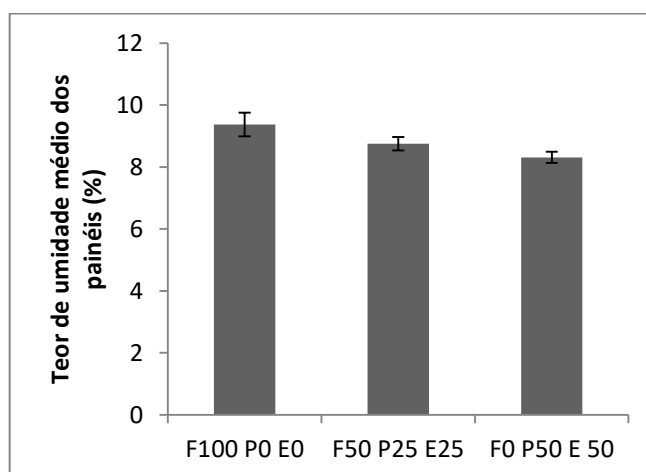
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Todos os painéis atenderam ao intervalo entre 5% e 13% de teor de umidade, como preconiza o documento normativo brasileiro e inferior a 10% como define a norma americana. Pode-se observar que o controle do teor de umidade das misturas de partículas contribuiu favoravelmente para o resultado obtido.

O teor de umidade inicial das partículas é um aspecto relevante no controle da umidade final requerida: “[...] Partículas com alto teor de umidade inicial podem resultar em umidade final acima do recomendado, podendo gerar problemas de formação de bolhas de vapor durante a prensagem dos painéis [...]” (IWAKIRI, 2020, p.149). Fenômeno este que não ocorreu nos painéis deste trabalho.

A Figura 60 apresenta a variação do teor de umidade média dos painéis para as composições de mistura de partículas.

Figura 60 - Teor de umidade dos painéis das composições estudadas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 61 ilustra os aspectos gerais dos painéis produzidos com 100% de fibra de coco com teor de umidade igual a 9,37%.

Figura 61 - Aspectos gerais dos painéis produzidos com 100% de fibra de coco.



(a) Vista lateral do painel



(b) Vista da superfície do painel

Fonte: acervo do autor

Nas Figuras 61(a) e 61(b) é possível verificar que ocorreu uma boa compactação das fibras de coco sem formação de bolhas e irregularidades, ou seja, é possível inferir que o baixo teor de umidade proposto (entre 0 e 2%), alcançado através de exposição das partículas ao sol e posterior secagem em estufa, contribuiu para a qualidade final dos painéis produzidos, uma vez que a umidade interfere no processo de cura da matriz randômica.

Uma das reações que podem ocorrer entre o isocianato presente na resina poliuretana e a eventual umidade em excesso nas partículas é a produção intermediária de ácido carbamático, que posteriormente se transforma, via reação química, em uma amida e gás carbônico, podendo propiciar a formação de bolhas no interior do painel, este fenômeno pode interferir negativamente nas propriedades físico-mecânicas dos painéis.

4.3.3 Inchamento (I) e Absorção (A) após 24 horas.

A Tabela 15 apresenta a classificação normativa ABNT (2018) referente ao Inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água para um grupo de painéis com espessura nominal entre 6 e 13 milímetros.

Cabe ressaltar que a ANSI (1999) não preconiza valores limite para inchamento em espessura, por este motivo, são apresentados os critérios normativos brasileiros.

Tabela 15 - Inchamento em espessura máximo por finalidade de uso.

Classificação por finalidade ABNT (2018)	Inchamento máximo para espessuras (> 6 a 13) mm(%)
P2	22
P3	17
P4	19 e 16**
P5	13 e 11**
P6	16
P7	10

** As classes P4 e P5 apresentam valores distintos para os intervalos de espessura (>6 a 10) mm e (>10 a 13) mm

Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

Na Tabela 16 são apresentados os valores médios de Inchamento em espessura acompanhados dos resultados de absorção obtidos para os painéis de cada composição. Por fim, é apresentada a classificação quanto à finalidade de uso, conforme descrito no item 3.2.6 referentes aos valores de inchamento.

Tabela 16– Inchamento em espessura médio após 24 horas e absorção de água.

Misturas	Absorção (%)	CV (%)	Inchamento após 24 h. (%)	CV (%)	Classificação (Inchamento)
F100 P0 E0	35,33	5,09	10,38	17,22	P2, P3, P4, P5 e P6
F50 P25 E25	48,94	7,94	14,54	15,36	P2, P3, P4 e P6
F0 P50 E50	37,67	5,81	9,33	12,09	Todos

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que todos os painéis das composições propostas se enquadraram em pelo menos quatro critérios classificativos normativos, com destaque para as composições F100 P0 E0 e F0 P50 E50 que atenderam respectivamente aos critérios P6 - Painéis estruturais para uso

em condições severas de carga, em condições secas e P7 - Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas.

Khedari *et al.* (2003) produziu painéis de partículas com 100% de fibra de coco como material de enchimento e três tipos diferentes de resina para aglutinação – *urea formaldehyde* (UF), *phenol formaldehyde* (PF) *isocyanate* (IC) – nos seguintes teores: UF 12%, PF 6% e IC 3%. Para cada tipo de resina, foram produzidos painéis com variadas densidades. Os painéis produzidos com 100% de fibra de coco e densidades de 0,648 g/cm³, 0,611 g/cm³ e 0,613 g/cm³ (para os três tipos de resina respectivamente) apresentaram inchamento em espessura de 53,353%, 32,635% e 32,303% respectivamente.

Estes resultados, encontrados pelos autores, são superiores aos apresentados na Tabela 16 (10,38%) para a composição de 100% de fibra de coco aglutinada com 10% de PU-Mamona.

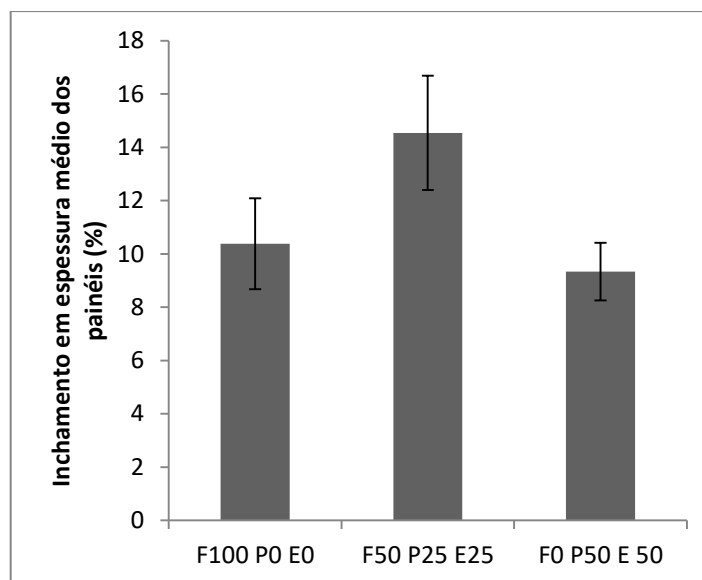
Fiorelli *et al.* (2012) também produziram painéis de partículas com apenas fibra de coco e densidades de 0,8 g/cm³ e 1,0 g/cm³ aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona (PU-Mamona) e (UF) na proporção de 10-15%. Os resultados de inchamento em espessura foram de: 15,30% e 19,67% para as densidades de 0,8 g/cm³ e 1,0 g/cm³ com PU-Mamona. Já para densidade de 1,0 g/cm³ e adesivo ureia formaldeído o inchamento em espessura atingiu 32,08%.

Diferentes teores de PU-Mamona foram estudados por Varanda *et al.* (2018) para produção de painéis de partículas de pínus (*Pinus elliottii*) e casca de aveia (*Avena sativa*). Dentre os tratamentos propostos pelos autores destaca-se, nesta discussão, aquele denominado Tr2 (100% de partículas de pínus, 0% de partículas de aveia e 11% de PU-Mamona).

O resultado médio obtido pelos autores para inchamento em espessura após 24 horas de imersão foi de 12,7%, da ordem dos apresentados na Tabela 16 – mesmo estes com menor teor de PU-Mamona (10%) – cabendo destacar que os painéis da composição F100 P0 E0 apresentaram teores de inchamento em espessura (10,38%) 18,3% inferiores aos do tratamento Tr2 (VARANDA *et al.*, 2018).

A Figura 62 ilustra um gráfico referente aos resultados médios obtidos de inchamento após 24 horas apresentados na Tabela 16, bem como a indicação do desvio padrão.

Figura 62 - Inchamento em espessura após 24 horas das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com Farag *et al.* (2020) o inchamento em espessura é talvez o fator mais importante ao se considerar o efeito da água, podendo ser afetado pela maioria das variáveis do processo produtivo, como a espécie de madeira, geometria das partículas, densidade do painel, teor de resina empregada na mistura e condições de pressão.

O aumento da razão de compactação – *compactation ratio* – pode ser associado à diminuição do inchamento em espessura após 24 horas de imersão, bem como outros fatores como o tipo de resina e sua distribuição, baixa compatibilidade entre substratos, densidade dos materiais e propriedades adesivas (NARCISO *et al.* 2020).

Estas afirmações podem explicar o inchamento em espessura mais elevado da composição F50 P25 E25 (evidenciado na Figura 62) que contava com mistura de partículas de madeira e fibra de coco, além de apresentar menor teor de compactação em relação às outras duas composições (Tabela 13).

A Figura 63 a seguir apresenta exemplares de corpos de prova que continham apenas fibra de coco como material de enchimento, antes e depois do ensaio de inchamento em espessura.

Figura 63 - Corpos de prova de painéis referentes à composição F100 P0 E0.



(a) Antes do ensaio

(b) depois do ensaio

Fonte: Acervo do autor

4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

4.4.1 Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR)

Considerando-se as dimensões dos painéis (35 cm x 35 cm x 1 cm) e com base na espessura de 10 mm, foi tomado como base para análise dos resultados obtidos para os painéis desse trabalho os valores mínimos estabelecidos pela ANSI (1999) e pela ABNT (2018) para painéis com espessuras entre 6 a 13 mm. A Tabela 17 apresenta os valores médios obtidos com os ensaios e os valores mínimos previstos correspondentes ao grupo de classificação por finalidade de uso dos painéis, conforme descrito no item 3.2.6.

Tabela 17 - Módulo de resistência à flexão estática mínima por finalidade de uso.

Classificação por finalidade ABNT (2018)	MOR mínimo espessuras (> 6 a 13)mm (N/mm ²)	Classificação por finalidade ANSI (1999)	MOR mínimo (N/mm ²)
P2	11,0	M-1	11,0
P3	15,0	M-S	12,5
P4	16,0	M-2	14,5
P5	18,0	M-3	16,5
P6	20,0	H-1	16,5
P7	22,0	H-2	20,5

Fonte: Adaptado de ABNT (2018) e ANSI (1999).

Na Tabela 18, são apresentados os valores médios do Módulo de Resistência à Flexão Estática, obtidos com os ensaios realizados, seus respectivos coeficientes

de variação e a classificação quanto aos critérios de uso proposto pelos documentos normativos.

Tabela 18 - Valores médios determinados para MOR e sua classificação

Composições	MOR (N/mm ²)	CV (%)	Classificação ABNT (2018)	Classificação ANSI (1999)
F100 P0 E0	16,70	12,38	P2, P3 e P4	M-1, M-S, M-2 e M-3
F50 P25 E25	19,40	5,85	P2, P3, P4 e P5	M-1, M-S, M-2, M-3 e H-1
F0 P50 E50	21,79	7,22	P2, P3, P4, P5 e P6	M-1, M-S, M-2, M-3, H-1 e H-2

Fonte: Elaboração do próprio autor

Segundo Farag *et al.* (2020) a resistência à flexão é uma propriedade direta na avaliação do desempenho do aglutinante.

Observou-se que todos os painéis produzidos apresentaram resultados que atenderam aos critérios mínimos de utilização das normas adotadas, alcançando as classificações P4 (ABNT, 2018) e M-3 (ANSI, 1999) para painéis que continham apenas fibra de coco e P6 (ABNT, 2018) e H-2 (ANSI, 1999) para aqueles que continham apenas partículas de madeira de pinus e eucalipto.

Painéis com menores teores de fibra de coco obtiveram maiores valores de resistência à flexão, sendo a composição F0 P50 E50, 30,48% mais resistente à flexão que a composição F100 P0 E0.

De acordo com Nicolao *et al.* (2020) a baixa resistência à flexão é uma das principais desvantagens da maioria dos painéis de partículas produzidos com matérias-primas alternativas em relação aos painéis produzidos com matéria-prima convencional.

Fiorelli *et al.* (2012) obtiveram resultados de flexão para painéis produzidos somente com fibra de coco e aglutinados com PU-Mamona de 17,94 MPa para densidade de 0,8 g/cm³ e de 17,92 MPa para densidade de 1,0 g/cm³, muito próximos ao apresentado na Tabela 18, igual a 16,70 MPa para painéis com densidade de 0,75 g/cm³, ou seja, de acordo com a literatura científica consultada sobre painéis aglomerados.

4.4.2 Módulo de Elasticidade (MOE)

A Tabela 19 a seguir apresenta os valores médios de MOE e suas respectivas classificações de uso para painéis aglomerados de partículas de acordo com a ANSI (1999) e ABNT (2018), considerando-se o grupo de painéis com espessura nominal entre 6 e 13 milímetros para os valores de módulo de elasticidade.

Tabela 19 - Módulo de Elasticidade mínimo por finalidade de uso.

Classificação por finalidade ABNT (2018)	MOE mínimo espessuras (> 6 a 13) mm (N/mm ²)	Classificação por finalidade ANSI (1999)	MOE mínimo (N/mm ²)
P2	1800	M-1	1725
P3	2050	M-S	1900
P4	2300	M-2	2250
P5	2550	M-3	2750
P6	3150	H-1	2400
P7	3350	H-2	2400

Fonte: Adaptado de ABNT (2018) e ANSI (1999)

Na Tabela 20 são apresentados os valores de Módulo de Elasticidade obtidos com os ensaios dos painéis de cada composição, seu respectivo coeficiente de variação e a classificação quanto à finalidade de uso propostos pelos documentos normativos.

Tabela 20 - Valores médios determinados para MOE e sua classificação

Composições	MOE (N/mm ²)	CV (%)	Classificação ABNT (2018)	Classificação ANSI (1999)
F100 P0 E0	1841	9,20	P2	M-1
F50 P25 E25	2033	7,09	P2	M-1 e M-S
F0 P50 E50	2924	4,79	P2, P3, P4 e P5	M-1, M-S, M-2, M-3, H-1 e H-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se na Tabela 20 que os valores de MOE de todos os painéis atenderam aos requisitos normativos mínimos da ABNT (2018) e da ANSI (1999).

Contudo é possível observar que a diminuição gradual dos teores de fibra de coco nos painéis aumentou consideravelmente seu módulo de elasticidade, sendo o MOE da composição F0 P50 E50, 58,83% superior ao da composição que continha somente fibra de coco.

Apesar disso, o resultado médio encontrado (1841 N/mm^2) para os painéis da composição F100 P0 E0 com densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$, se assemelha aos resultados encontrados por Fiorelli *et al.* (2012), iguais a 1405 MPa e 1396 MPa para painéis com 100% fibra de coco, 10 e 15% de PU-Mamona, mas com densidades de $0,8 \text{ g/cm}^3$ e $1,0 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Neste sentido, Yang e Hu (2014) encontraram o valor de 1,88 GPa (1880 MPa) para módulo de elasticidade de painéis de partículas produzidos somente com fibra de coco aglutinadas com adesivos utilizados industrialmente, os valores obtidos evidenciam a eficiência da resina poliuretana derivada de óleo de mamona na aglutinação de fibra de coco para produção de painéis de partículas.

Estudos desenvolvidos por Sugahara *et al.* (2019) avaliaram a interferência do aglutinante nos resultados físico-mecânicos de painéis de partículas homogêneos de densidade igual a $0,996 \text{ g/cm}^3$ com 60% de partículas de madeira de eucalipto e 40% de bagaço de cana-de-açúcar em sua composição.

Os painéis aglutinados com resina poliuretana PU-Mamona obtiveram módulo de elasticidade igual a 3020 MPa, valor próximo ao encontrado para a composição que continha 50% de partículas de madeira de eucalipto e 50% de partículas de madeira de pínus, conforme observado na Tabela 20.

4.4.3 Resistência à Tração Perpendicular (TP)

A Tabela 21 apresenta a classificação de uso dos painéis de partículas de acordo com a ANSI (1999) e ABNT (2018) para painéis com espessura nominal entre 6 e 13 milímetros considerando-se a Resistência à Tração Perpendicular.

Na Tabela 22 são apresentados os valores de resistência à tração perpendicular, obtidos nos ensaios dos painéis de cada composição, seu coeficiente de variação e as respectivas classificações quanto à finalidade de uso previstas pelos documentos normativos: brasileiro e americano.

Tabela 21 - Resistência à tração perpendicular mínima por finalidade de uso.

Classificação por finalidade ABNT (2018)	TP mínima espessuras (> 6 a 13) mm (N/mm ²)	Classificação por finalidade ANSI (1999)	TP mínima espessuras (> 6 a 13) mm (N/mm ²)
P2	0,40	M-1	0,40
P3	0,45	M-S	0,40
P4	0,40	M-2	0,45
P5	0,45	M-3	0,55
P6	0,60	H-1	0,90
P7	0,75	H-2	0,90

Fonte: Adaptado de ABNT (2018) e ANSI (1999)

Tabela 22 - Valores médios determinados para TP e sua classificação

Composições	TP (N/mm ²)	CV (%)	Classificação ABNT (2018)	Classificação ANSI (1999)
F100 P0 E0	0,53	6,21	P2, P3, P4 e P5	M-1, M-S e M-2
F50 P25 E25	0,64	8,39	P2, P3, P4, P5 e P6	M-1, M-S, M-2 e M-3
F0 P50 E50	0,89	10,75	Todos	M-1, M-S, M-2 e M-3

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados de Resistência à Tração Perpendicular estão de acordo com os demais ensaios mecânicos, ou seja, aumenta com a diminuição gradual do teor de fibra de coco nos painéis produzidos. Vale ressaltar que todos os painéis referentes às composições estudadas, atenderam no mínimo a quatro critérios normativos.

Verificou-se que os painéis da composição F100 P0 E0 classificaram-se no grupo P5 – Painéis estruturais para uso em condições úmidas (ABNT, 2018) e o grupo M-2 – Painéis de partículas de média densidade grau 2 (ANSI, 1999).

O resultado médio de resistência à tração perpendicular alcançado pelos painéis da composição F100 P0 E0 foi próximo aos encontrados por Owondunni *et al.* (2020) que produziu painéis somente com fibra de coco, variando o adesivo empregado na aglutinação e seus teores (10%, 12% e 15%).

Fiorelli *et al.* (2019) produziu painéis de partículas de 3 camadas utilizando nas camadas externas (10% em massa por camada) apenas bagaço de cana-de-açúcar e na camada interna (80% em massa) somente fibra de coco, aglutinadas com PU-Mamona (15% nas camadas externas e 12% na interna). Os resultados

obtidos pelos pesquisadores para resistência à tração perpendicular foram de 0,20 MPa e 0,35 MPa para painéis com densidades médias de 0,529 g/cm³ e 0,692 g/cm³.

Segundo Fiorelli *et al.* (2019), a diferença de densidade dos painéis procedeu a resultados significativamente diferentes, com aumento de todas as propriedades mecânicas quando aumentada a densidade.

Fiorelli *et al.* (2018) descreve que painéis de partículas produzidos com maiores teores de holocelulose (celulose + hemicelulose) apresentam melhores propriedades mecânicas. Dentro deste contexto, a Tabela 23 apresenta um levantamento de resultados encontrados por diversos pesquisadores para fibra de coco e madeira de pínus e eucalipto, que apontam para maiores teores de holocelulose nas madeiras, em conformidade com os resultados mecânicos.

Tabela 23 - Características químicas da fibra de coco e madeira de pínus e eucalipto

Autor	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Holocelulose
<i>Espécie / nome usual</i>	(%)	(%)	(%)	(%)
Fiorelli <i>et al.</i> (2019)				
<i>Green coconut</i>	53,71	13,04	30,08	66,75
Alharbi <i>et al.</i> (2020)				
<i>Coconut coir</i>	46±0,5	16±0,5	28±0,5	62±1,0
Narciso <i>et al.</i> (2020)				
<i>Coconut husk</i>	39,73±1,01	29,02±0,98	32,98±1,69	68,75±1,99
<i>Pinus Oocarpa</i>	51,86±0,37	23,61±0,37	28,62±0,22	75,47±0,74
Fiorelli <i>et al.</i> (2014)				
<i>Coconut fiber</i>	56,69	25,11	16,64	81,80
<i>Pinus sp.</i>	51,13	27,29	15,10	78,42
Bravo <i>et al.</i> (2017)				
<i>Pinus sp.</i>	40,20	31,40	27,20	71,60
Evtuguin <i>et al.</i> (2007)				
<i>Eucalyptus globulus</i>	50,00	24-27	20,50	74-77
<i>Eucalyptus urograndis</i>	48,60	-	26,70	-
<i>Eucalyptus grandis</i>	46,60	-	25,70	-

Fonte: Elaborado com base nos autores citados.

4.5 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS

Na Tabela 24 são apresentados os valores médios (Méd.), os coeficientes de variação (CV) e os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) das propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados de acordo com as três composições experimentais delineadas, cabendo destacar que os valores-p do teste de normalidade de Anderson-Darling ($0.193 \leq \text{valores-p} \leq 0.822$) foram ambos superiores ao nível de 5% de significância, validando assim os resultados dos intervalos de confiança (IC).

Tabela 24 - Resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados

Composição	Estat.	D (kg/m ³)	U (%)	I (%)
F100 P0 E0	Méd.	0.75	9.37	10.38
	CV (%)	2.09	4.31	17.22
	IC (95%)	(0.75; 0.76)	(9.20; 9.54)	(9.34; 11.42)
F50 P25 E25	Méd.	0.85	8.75	14.54
	CV (%)	1.53	2.55	15.36
	IC (95%)	(0.84; 0.85)	(8.58; 8.92)	(13.50; 15.59)
F0 P50 E50	Méd.	0.97	8.31	9.33
	CV (%)	1.38	2.28	12.09
	IC (95%)	(0.96; 0.98)	(8.13; 8.47)	(8.28; 10.36)
Composição	Estat.	TP (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
F100 P0 E0	Méd.	0.53	16.70	1841
	CV (%)	6.21	12.38	9.20
	IC (95%)	(0.49; 0.57)	(15.83; 17.5)	(1762.0; 1920.2)
F50 P25 E25	Méd.	0.64	19.40	2033
	CV (%)	8.39	5.85	7.09
	IC (95%)	(0.60; 0.67)	(18.54; 20.2)	(1954.0; 2112.2)
F0 P50 E50	Méd.	0.89	21.79	2924
	CV (%)	10.75	7.22	4.79
	IC (95%)	(0.84; 0.92)	(20.93; 22.6)	(2845.2; 3003.4)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 25 apresenta os resultados do teste de Tukey considerando os valores de ensaios obtidos para os painéis das três composições propostas neste trabalho, permitindo eleger a melhor composição por propriedade física e mecânica investigada. Os valores-p do teste de normalidade de Anderson-Darling e de Comparações Múltiplas variaram entre 0.069 a 0.726 e 0.093 a 0.572, respectivamente, o que valida os resultados do teste de Tukey.

Tabela 25 - Resultados do teste de contraste de médias de Tukey para os painéis avaliados das três composições

Composições	D	U	I	TP	MOR	MOE
F100 P0 E0	C	A	B	C	C	C
F50 P25 E25	B	B	A	B	B	B
F0 P50 E50	A	C	B	A	A	A

Letras iguais nas colunas implicam em composições distintas com médias estatisticamente equivalentes (5% de significância).

Na Tabela 26 são apresentados os resultados do Teste de Tukey considerando-se a variação dos teores de fibra de coco, de madeira de pínus e de eucalipto, o que possibilita compreender melhor os resultados obtidos do Teste de Tukey relacionados aos resultados obtidos para os painéis das três composições (Tabela 25). Os valores-p do teste de normalidade de Anderson-Darling e de Comparações Múltiplas variaram entre 0.081 a 0.453 e 0.105 a 0.792, respectivamente, o que valida os resultados do teste de Tukey.

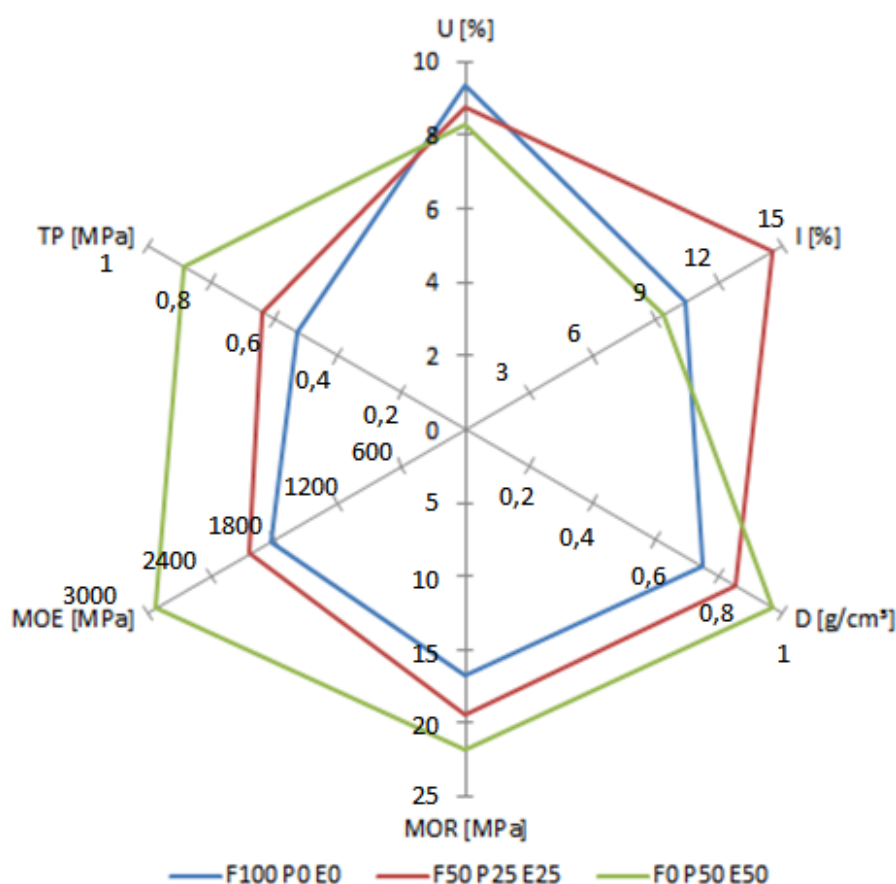
Tabela 26 - Resultados do teste de contraste de médias de Tukey considerando os teores de fibra de coco e de madeiras de pínus e de eucalipto

Propriedades.	Coco (%)			Pínus (%)			Eucalipto (%)		
	100	50	0	0	25	50	0	25	50
D	C	B	A	C	B	A	C	B	A
U	A	B	C	A	B	C	A	B	C
I	B	A	B	B	A	B	B	A	B
TP	C	B	A	C	B	A	C	B	A
MOR	C	B	A	C	B	A	C	B	A
MOE	C	B	A	C	B	A	C	B	A

Letras iguais nas linhas implicam em composições distintas com médias estatisticamente equivalentes (5% de significância).

Finalmente, a Figura 64 a seguir apresenta uma visão geral das propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos para cada composição (F100 P0 E0, F50 P25 E25 e F0 P50 E50) com o intuito de apresentar de forma concisa os resultados obtidos e evidenciar a influência da densidade do painel produzido em suas propriedades mecânicas (MOR, MOE e TP).

Figura 64 - Visão geral das propriedades físico-mecânicas dos painéis produzidos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Por meio dos estudos realizados, pôde-se concluir que o teor de umidade das partículas entre 0 e 2% resultou em painéis com boas qualidades físicas, mecânicas e dimensionais, sem a presença de bolhas decorrente de acúmulo de gases ou irregularidades superficiais, ou seja, o teor de umidade foi favorável às características do adesivo (PU-Mamona) utilizado, uma vez que a umidade interfere no processo de cura do adesivo com as partículas inseridas na matriz randômica.

Foi verificado que o teor de fibra de coco influenciou na densidade e nas propriedades mecânicas dos painéis, ou seja, com menores teores de fibra de coco foram produzidos painéis mais densos e com maiores resistências.

Entretanto, a produção de painéis de partícula com 100% de fibra de coco como o principal constituinte da matriz randômica, apresentou-se de forma promissora, quando observados os resultados físicos e mecânicos em consonância com os critérios mínimos exigidos pela ABNT (2018) e ANSI (1999). Neste sentido, destaca-se o ensaio físico de inchamento em espessura após 24 horas, observou-se que os painéis produzidos com 100% de fibra de coco apresentaram resultados estatisticamente equivalentes a um nível de 5% de significância àqueles produzidos com apenas partículas de madeira o que denota a viabilidade do emprego deste material alternativo de origem agroindustrial.

6 PROPOSTA PARA PRÓXIMOS ESTUDOS

Como sugestão para próximos estudos, com o intuito de contribuir com desenvolvimento científico, sugere-se a variação nos teores de resina (PU-Mamona) a fim de se verificar a possibilidade de diminuição do consumo deste aglutinante.

Outra possibilidade seria a experimentação de novos teores de fibra de coco em relação às partículas de madeira de pínus e eucalipto, com o intuito de observar o comportamento das composições de misturas intermediárias às experimentadas neste trabalho.

Por fim, apresenta-se como sugestão o estudo de processos, metodologias e tratamentos para uma homogeneização mais rápida e eficiente da fibra de coco com a(s) resina(s) aglutinante(s) para produção de painéis de partículas.

REFERÊNCIAS

ALHARBI M. A. H., HIRAI, S., TUAN, H. A., AKIOKA, S., SHOJI, W. Effects of chemical composition mild alkaline pretreatment and particle size on mechanical, thermal and structural properties of binderless lignocellulosic biopolymers prepared by hot-pressing raw microfibrillated *Phoenix dactylifera* and *Cocos nucifera* fibers and leaves. **Polymer Testing.**, London, v. 84 p. 106384, 2020.

ALMEIDA, P. F. **Análise tribológica do sistema de polimento com abrasivos à base de resina de mamona para acabamento superficial de rochas ornamentais.** 2019. 144 f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – ANSI. A208.1 : Particleboards. Gaithersburg, MD, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 1554 – 10**, 2016. Standard Terminology Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. United States, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 3878 – 19**, 2019. Standard Terminology for Composite Materials. United States, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Estudo Setorial - Em Síntese.** Curitiba-PR, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457:** Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9939:** Agregado graúdo: determinação do teor de umidade total: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248:** Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 26:** Agregados: Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM ISO 2395:** Peneira de ensaio e ensaio de peneiramento: vocabulário. Rio de Janeiro, 1997b.

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 – ABNT. **NBR. 14.810-2:** Painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR. 7190:** Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997a.

BAHAROGLU, M., NEMLI, G., SARI, B., BARDAK, S., AYRILMIS, S. The influence of moisture content of raw material on the physical and mechanical properties, surface roughness, wettability, and formaldehyde emission of particleboard composite. **Composites: Part B**, Oxford, v. 43, p. 2448-2451, 2012.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Panorama de Mercado: Painéis de Madeira.** BNDES Setorial 40, p. 323-384, 2014

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Panorama de Mercado: Painéis de Madeira.** BNDES Setorial 32, p. 49-90, 2010.

BIBIN, C., GOPINATHA, S., ARAVINDRAJA, R., DEVARAJA, A., KRISHNANA, S. G., JEEVAANANTHAN, J.K.S. The production of biodiesel from castor oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition Engine: A comprehensive review. **Materials Today: Proceedings.**, Amsterdam, v. x p. x, 2020.

BRAINER, M. S. C. P., Produção de coco: o Nordeste é destaque nacional. **Caderno Setorial ETENE Banco do Nordeste**, ano 3, n. 61, dez 2018.

BRANDÃO, W. **Deslumbramento de um Triste.** São Paulo: oficina d' O Estado de S. Paulo, 1920.

BRAVO, C., GARCÉS, D., FABA, D. L., SASTRE, H., ORDÓNEZ, S. Selective arabinose extraction from Pinus sp. sawdust by two-step soft acid hydrolysis, **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 104, p. 229-236, 2017.

CAMPOS, C. I., LAHR, F. A. R., Production and characterization of MDF using eucalyptus fiber and castor-oil based polyurethane resin. **Materials Research.**, São Carlos, v. 7 n. 3 p. 421-425, 2004.

CARNEIRO, A.C.O., VITAL, B.R., PIMENTA, A.S. DELLA LUCIA, R.M. Flakes plates Properties manufactured with urea formaldehyde adhesive and Eucalyptus grandis bark tannins W. Hill ex Maiden or Eucalyptus pellita F. Muell, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 5 p. 715-724, 2004.

CAVALCANTE, L. V. **A Nova Geografia do Coco: Reestruturação Produtiva, Territorialização do Capital e Dinâmicas Socioespaciais.** 2015, 298f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia) – Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2015.

ÇOLAK, S., ÇOLAKOĞLU, G., AYDIN, I., KALAYCIOĞLU, H., Effects of steaming process on some properties of eucalyptus particleboard bonded with UF and MUF adhesives. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 42, p. 304-309, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos**. v.7 Safra 2019/20. Abril, 2020.

CRAVO, J. C. M., SARTORI, D. L., MÁRMOL, G., SCHMIDT, G. M., BALIEIRO, J. C. C., FIORELLI, J. Effect of density and resin on the mechanical, physical and thermal performance of particleboards based on cement packaging. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 151, p. 414-421, 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) - Curso de Engenharia de Matérias, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DROVOU, S., KASSENE, K. A., KADJA, K., KOUTSAWA, Y., SANDA, K. Effect of granulometry and binder rate on the physical, thermal and mechanical properties of Africa antiaris (*Antiaris africana*) sawdust particleboard made with the tannic power of African locust bean pod husk (*Parkia biglobosa*) and the India tamarind (*Pithecellobium dulce*) peel. **J Indian Acad Wood Sci.**, New Delhi, v. 16, n. 2 p. 94-102, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA . **A Cultura do Coqueiro no Brasil**. 3° ed. Brasília, EMBRAPA, 2018. 508 p. 18,5 x 25,5 cm.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Coprodutos**, 2010. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/coco/arvore/CONT000giw3qz5o02wx5ok05vadr1u5iye30.html#>> Acesso em abril de 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Painéis Elaborados com Resíduos de Casca de Coco Verde. **Circular Técnica**, Fortaleza, v. 35, dez. 2011. Embrapa.

EVTUGUIN, V. D., NETO, C. P. Recent advances in eucalyptus wood chemistry: structural features through the prism of technological response. In: **3rd International Colloquium on Eucalyptus Pulp**. 2007, Belo Horizonte-MG.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**, 6° ed., v. 01, Rio de Janeiro, LTC, 2019. 568 p. 24 x 17 cm.

FARAG, E., ALSHEBANI, M., ELHRARI, W., KLASH, A., SHEBANI, A. Production of particleboard using olive stone waste for interior design. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 29, p. 101119, 2020.

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

FIORELLI, J., BUENO, S. B., CABRAL, M. R., Assessment of multilayer particleboards produced with green coconut and sugarcane bagasse fibers. **Construcion and Building Materials**, Amsterdam, v. 205, p. 1-9, 2019.

FIORELLI, J., GALO, R. G., CASTRO JUNIOR, S. L., BELINI, U. F., LASSO, P. R. O., SAVASTANO, H. Multilayer particleboard produced with agroindustrial waste and amazona vegetable fibers. **Waste Biomass Valorization**., Dordrecht, v. 9 p. 1151-1161, 2018.

FIORELLI, J., GOMIDE, C. A., LAHAR, F. A. R., NASCIMENTO, M. F., SARTORI, D. L., BALLESTEROS, J. E. M., BUENO, S. B., BELINI, U. F. Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers. **Cellulose**, Dordrecht, v. 21, p. 3269- 3277, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Forest Products Conversion Factors**. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/ca7952en>> Acesso em maio de 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Joint Forest Sector Questionnaire Definitions**. FAO, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/7800-0a5bab2847536d345f55cf15f77c2601.pdf>> Acesso em: maio de 2020.

FREIRE, A. L. F., JÚNIOR, C. P. A., ROSA, M. F., NETO, J. A. A., FIGUEIRÊDO, M. C. B. Environmental assessment of bioproducts in development stage: The case of fiberboards made from coconut residues. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 153, p. 230-241, 2017.

GILIO, C. G., BISPO, R. A., TREVISAN, M. F., RODRIGUES, R. F., JUNIOR, L. C. F. A., SILVA, S. A. M. Produção de painéis aglomerados empregando-se seringueira, teca e poliuretano derivado do óleo de mamona. In: **XVII EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. 2021, Florianópolis-SC.

HOUAISS, A., VILLAR, M. S., FRANCO, F. M. M. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. 1ed. Rio de Janeiro. Editora Objetiva Ltda., 2001. 2922p.

HÝSKOVÁ, P., HÝSEK, S., SCHÖNFELDER, O., ŠEDIVKA, P., LEXA, M., JARSKÝ, V. Utilization of agricultural rests: Straw-based composite panels made from enzymatic modified wheat and rapeseed straw. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 144, p.112067, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório 2019**, Capítulos VI e VIII, p. 44, 65. Brasília, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório 2020**, Capítulo IV, p. 25, 32. Brasília, 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira via Satélite**. São José dos Campos: INPE, 2020. Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/deforestation?hl=pt-br>> Acesso em: maio de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra no Brasil: 2016-2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**, Rio de Janeiro, v. 33, p.1-8, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. 2019a. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/5457>> Acesso em: abril de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2019b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5930>> Acesso em: abril de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2019c. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/291>> Acesso em: abril de 2020.

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

KHEDARI, J., CHAROENVAI, S., HIRUNLABH, J. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 38, p. 435-441, 2003.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry-process fiber board manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1977.672 p.

MENDES, R. F., MENDES, L. M., GUIMARÃES JÚNIOR, J. B., MORI, F. A., CÉSAR, A. A. S. Coffee husk incorporation effect on physical and mechanical properties of particleboard of Eucalyptus urophylla S.T. Blake. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 610-617, 2010.

MESQUITA, R. G. A., MARCONCINI, J. M., SANADI, A. R., CÉSAR, A. A. S., TONOLI, G. H. D., VENAS, T. M., MENDES, L. M. Coir and Sisal Fibers as Fillers in the Production of Eucalyptus Medium Density Particleboards – MDP. **Materials Research**, São Carlos, v. 19 n.6 p.1429-1436, 2016.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard** vol I – Materials. Southern Illinois University Press, London – Amsterdam, 1974, 244 p.

NARCISO, C. R. P., REIS, A. H. S., MENDES, J. F., NOGUEIRA, N. D., MENDES, R. F., Potential for the Use of Coconut Husk in the Production of Medium Density Particleboard. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, p. 1-12, 2020.

NICOLAO, E. S., LEIVA, P. CHALAPUD, M. C., RUSECKAITE, R. A., CIANNAMEA, E. M., STEFANI, P. M. Flexural and tensile properties of biobased rice husk-jute-soybean protein particleboards. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 30, p. 101261, 2020.

OLIVEIRA, S. L., PEREIRA, T. V. T., MENDES, L. M., MENDES, R. F. Laminar Inclusion in Sugarcane Bagasse Particleboard. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 2 p. 153-160, 2017.

OWODUNNI, A. A., LAMAMING, J., HASHIM, R., FOLAHAN, O., TAIWO, A., HUSSIN, M. H., KASSIM, M. H. M., BUSTAMI, Y., SULAIMAN, O., AMINI, M. H. M., HIZIROGLU, S. Properties of green particleboard manufactured from coconut fiber using a potato starch based adhesive. **Bioresouces**, Raleigh, v. 15 n. 2 p. 2279-2292, 2020.

PENCHAH. H. K., SHARIFI, M., MOUSAZADEH, H., HOSSEINABADI, H. Z., PELESARAEI, A. N., Gate to gate life cycle assessment of flat pressed particleboard production in Islamic Republic of Iran. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112 p. 334-350, 2016.

PFEIL, W., PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 240 p. 28 x 21 cm.

SINDICATO NACIONAL DOS PRODUTORES DE COCO DO BRASIL - SINDCOCO. **Boletim Conjuntural- Comércio Exterior de Produtos de Coco**. mar. 2020.

SINDICATO NACIONAL DOS PRODUTORES DE COCO DO BRASIL - SINDCOCO. **Boletim Conjuntural - Importações de Coco Ralado e de Água de Coco e de Turfa: Um Balanço do Quinquênio 2014/2018**. jan. 2019.

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

SUGAHARA, E. S., SILVA, S. A. M., BUZO, A. L. S. C., CAMPOS, C. I., MORALES, E. A. M., FERREIRA, B. S., AZAMBUJA, B. A., LAHR, F. H. R., CHRISTOFORO, A. L. Hight-density particleboard made from Agro-industrial Waste and Different Adhesives. **Bioresources**, Raleigh, v. 14 n. 3 p. 5162-5170, 2019.

TREVISAN. M. F., OLIVEIRA, R. C., BISPO, R. A., GILIO, C. G., RODRIGUES, F. R., SILVA, S. A. M. Influence of leather fiber on modulus of elasticity in bending test and of bend strength of particleboards. In. **5th BCCM – Brazilian Conference on Composite Materials**. 2021, São Carlos-SP.

VANNIEKERK, I. A., PIZZI, A. Characteristic industrial-technology forexterior eucalyptus particleboard. **Holz als Roh-Werkstof**, Heidelberg, v. 52 p.109-112, 1994.

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

ZHANG, L., HU, Y., Novel lignocellulosic hybrid particleboard composites made from rice straw sand coir fibers. **Materials and Design**, London, v. 55 p. 19-26, 2014.