

BRUNO SANTOS FERREIRA

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS
PARTICULADOS DE *Eucalyptus saligna* COM ADIÇÃO DE
CASCA DE NOZ MACADÂMIA**

BRUNO SANTOS FERREIRA

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS
PARTICULADOS DE *Eucalyptus saligna* COM ADIÇÃO DE
CASCA DE NOZ MACADÂMIA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cristiane Inácio de Campos

Guaratinguetá
2013

F383p	Ferreira, Bruno Santos Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de <i>Eucalyptus saligna</i> e casca de noz macadâmia / Bruno Santos Ferreira – Guaratinguetá : [s.n], 2013. 86 f : il. Bibliografia: f. 82 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves Coorientadora: Prof^a Dr^a Cristiane Inácio de Campos 1. Madeira 2. Chapa de madeira aglomerada I. Título CDU 674(043)
-------	---

BRUNO SANTOS FERREIRA

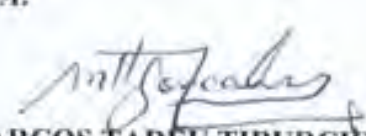
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

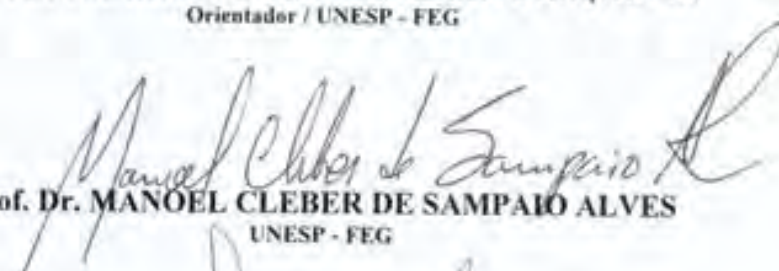
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

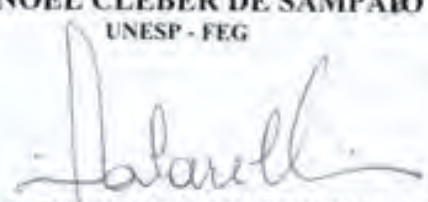
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Coechieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONÇALVES
Orientador / UNESP - FEG


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP - FEG


Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI
UNESP - Bauru

Junho de 2013

DADOS CURRICULARES

BRUNO SANTOS FERREIRA

NASCIMENTO	29.05.1988 – ITAPEVA/SP
FILIAÇÃO	José Luiz Rodrigues Ferreira Elisabete Moraes dos Santos
2004/2005	Técnico em informática – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
2006/2011	Curso de graduação em Engenharia Industrial Madeireira – Universidade Estadual Paulista – Campus Experimental de Itapeva
2011/2013	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar e acima de tudo a Deus, o Soberano e Criador de todas as coisas, sem o qual esse trabalho não poderia ter sido realizado! A esse Deus misericordioso que um dia deu seu Filho unigênito para morrer eu meu lugar, mesmo eu sendo ainda pecador, mesmo eu não merecendo nada, somente pela Sua graça, a Ele eu agradeço por tudo hoje e sempre, pois dele, por Ele e para Ele são todas as coisas!

Agradeço aos meus pais, José Luiz e Elisabete, a quem amo tanto, e que me deram a oportunidade de ter feito mestrado.

Agradeço ao meu irmão Gustavo, sem o qual minha vida não seria tão feliz, a quem eu amo demais.

Agradeço ao Josmar e a Eliana, minha segunda família, pessoas que eu amo muito, que fazem parte da minha vida e da minha felicidade, que sempre têm estado ao meu lado, me ajudando em tudo.

Agradeço ao meu orientador Marcos Tadeu e a minha coorientadora Cristiane pela grande ajuda e pelos ensinamentos tão preciosos para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu professor Carlão, também pela ajuda na realização deste trabalho, e por sempre ouvir minhas dúvidas e me ajudar!

Agradeço a todos os funcionários da Unesp de Itapeva e de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e vontade de ajudar. Em especial ao Juliano Brito que esteve presente me auxiliando no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a CAPES por ter pelo apoio dado à realização desta pesquisa.

E por fim agradeço novamente a Deus por ter permitido todas estas pessoas em minha vida.

FERREIRA, B. S. **Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de *Eucalyptus saligna* e casca de noz macadâmia**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Estudos relacionados a matérias-primas alternativas para a substituição parcial ou total de madeira na produção de produtos engenheirados, mais especificamente de painéis, vem sendo desenvolvidos com a finalidade de diminuir a utilização da madeira e também aproveitar resíduos, que muitas vezes não possuem valor agregado. Por este motivo este trabalho teve o intuito de caracterizar a utilização da casca de noz macadâmia na produção de painéis de partículas, tendo em vista que esta casca é um resíduo com alta resistência, porém raramente possui utilização. Para tanto se testou quatro composições de painéis de partículas, com 0%, 30%, 60% e 100% de casca de noz macadâmia com base na massa de partículas. Avaliou-se a razão de esbeltez das partículas e as propriedades físico-mecânicas dos painéis com base na norma brasileira ABNT NBR 14810-3 (2006). Foram realizados os ensaios físicos de densidade, teor de umidade, inchamento em espessura durante 2 e 24 horas e absorção de água durante 2 e 24 horas. Os ensaios mecânicos realizados foram de flexão estática, para a determinação do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE), e o de tração perpendicular à superfície também conhecido como adesão interna. Com os resultados obtidos notou-se que com a adição de casca de noz macadâmia ocorreu diminuição da resistência mecânica, tanto com relação a adesão interna quanto com relação ao MOR e MOE, sendo que este último diminuiu abruptamente com a adição de apenas 30%; e maior instabilidade dimensional, pois ocorreu o aumento do inchamento em espessura e da absorção de água. Este resultado foi devido principalmente à geometria das partículas de macadâmia que não permitiu uma boa interação entre o substrato e o adesivo. Destaca-se ainda que a alta densidade da casca de noz macadâmia dificultou a interação entre as partículas, pois impediu uma suficiente compactação do painel.

Palavras-chave: Aglomerado. Madeira. Caracterização física. Caracterização mecânica.

FERREIRA, B. S. **Physical and mechanical properties of particleboards of *Eucalyptus saligna* and macadamia nutshell.** 2013. 77 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

Studies related to alternative raw materials for the partial or total substitution of wood in the production of engineered products, specifically panels, has been developed with the aim of reducing the use of wood and also recycle waste that often have no value. For this reason this study aimed to characterize the use of macadamia nutshell in the production of particleboard, given that this bark is a residue with high strength, but rarely has use. For that four different compositions of particle boards with 0%, 30%, 60% and 100% of macadamia nutshell based on the mass of particles were tested. The slenderness ratio of the particles and the physical-mechanical properties of panels were evaluated based on the Brazilian standard ABNT NBR 14810-3 (2006). The physical tests performed were density, moisture content, thickness swelling for 2 hours and 24 hours and the water absorption during 2 hours and 24 hours. The mechanical tests performed were the static bending, for determining the modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) and the tension perpendicular to surface also known as internal bonding. With the results obtained it was noted that with the addition of Macadamia nutshell there was a decrease in mechanical strength, with respect to internal bonding and MOR and MOE, which latter abruptly decreased with the addition of only 30%; and in the dimensional stability, because occurred the increasing of the thickness swelling and water absorption. This result was mainly due to the macadamia particles geometry, which did not allow a good interaction between the substrate and the adhesive. Note also that the high density of the macadamia nutshell hindered the interaction between particles, because it blocked a sufficient panel compression.

Keywords: Particleboard. Wood. Physical Characterization. Mechanical Characterization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Elementos de madeira (IWAKIRI, 2005).	19
FIGURA 2 – Unidades produtoras de painéis de madeira reconstituída (ABIPA, 2013a).	20
FIGURA 3 – Distribuição de camadas dos painéis de partículas (Adaptado de MOSLEMI, 1974).	21
FIGURA 4 – Relação entre a densidade da matéria-prima e a resistência à flexão para quatro densidades do painel de partículas (IRLE et. al., 2012).	23
FIGURA 5 – Flexão estática de painéis aglomerados em função da massa específica. (A) MOE x Massa Específica. (B) MOR x Massa Específica (IWAKIRI et. al., 2008).	24
FIGURA 6 – Esquema geral da produção de painéis de partículas (IWAKIRI, 2005).	27
FIGURA 7 – Gotas de água na superfície de uma lâmina de madeira após 30 segundos mostrando a diminuição do ângulo entre a gota e a madeira. A gota da esquerda está sobre uma superfície não tratada, a do meio sobre uma superfície onde houve duas passadas de lixa 320, a da direita sobre uma superfície com quatro passadas da lixa 320 (FRIHART, 2012).	34
FIGURA 8 – Árvore de macadâmia (França, 2007).	39
FIGURA 9 – Fruto da macadâmia. (A) Fruto envolto pelo pericarpo, casca externa verde; (B) Rompimento do pericarpo, amadurecimento do fruto; (C) Noz com casca; (D) Casca que envolve o núcleo; (E) Núcleo comestível (NAGAO, 2011).	40
FIGURA 10 – Produção mundial média de noz macadâmia dos anos de 2006 a 2011 em toneladas (INTERNATIONAL NUT & DRIED FRUIT, 2010).	41
FIGURA 11 – Regiões produtoras de noz macadâmia no estado de São Paulo (COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL – CATI, 2009).	42
FIGURA 12 – Microestrutura da casca de noz macadâmia (WANG; MAI, 1994).	43
FIGURA 13 – Equipamentos utilizados para a geração das partículas; (a) Picador/Redução Primária; (b) Moinho/Redução secundária.	47
FIGURA 14 – Agitador de peneiras utilizado para a classificação das partículas.	48
FIGURA 15 – Partículas de eucalipto e de casca de macadâmia da peneira de 20 mesh.	48
FIGURA 16 – Preparação do adesivo; (a) 1 – adesivo, 2 – catalisador, 3 – emulsão de parafina e 4 – água; (b) Mistura dos componentes da solução adesiva.	49
FIGURA 17 – Equipamento utilizado para a mistura.	50

FIGURA 18 – Forma vazada para a formação do painel.	50
FIGURA 19 – Colchão de partículas do painel de 100% de macadâmia após a pré-prensagem.	51
FIGURA 20 – Prensa utilizada na prensagem dos painéis.	51
FIGURA 21 – Sachê de papel filtro utilizado para a realização da determinação do teor de extrativos totais.	53
FIGURA 22 – Processo de extração; (a) Extração com etanol-tolueno e etanol; (b) Extração com banho Maria.	54
FIGURA 23 – Sistema de filtração a vácuo.	55
FIGURA 24 – pHmetro utilizado na determinação do pH.	56
FIGURA 25 – Corpos de prova de teor de umidade e densidade, provenientes do tratamento 1, 2, 3 e 4, da esquerda para a direita, respectivamente.	57
FIGURA 26 – Medição da espessura do corpo de prova em cinco pontos.	59
FIGURA 27 – (a) Corpos de prova para o ensaio de inchamento e absorção de água, provenientes do tratamento 1, 2, 3 e 4, da esquerda para a direita, respectivamente; (b) Medição da espessura de um corpo de prova para o ensaio de inchamento.	60
FIGURA 28 – Máquina universal de ensaios utilizada para realização dos testes mecânicos.	61
FIGURA 29 – Corpos de prova de flexão estática, provenientes do tratamento 1, 2, 3 e 4, de baixo para cima, respectivamente.	62
FIGURA 30 – Ensaio de flexão sendo realizado na máquina universal de ensaios.	63
FIGURA 31 – Preparação do corpo de prova para o ensaio de adesão interna. (a) Sapatas; (b) Colagem dos corpos de prova com um sargento.	64
FIGURA 32 – Ensaio de tração perpendicular na máquina universal de ensaios.	65
FIGURA 33 – Gráfico da distribuição dos dados de razão de esbeltez.	66
FIGURA 34 – Módulo de ruptura, inchamento em espessura, absorção de água e expansão linear em função da razão de esbeltez (Adaptado de MOSLEMI, 1974).	67
FIGURA 35 – Regressão linear da densidade em função da proporção de casca.	70
FIGURA 36 – Regressão linear do teor de umidade em função da proporção de casca.	71
FIGURA 37 – Gráfico de regressão linear para o inchamento em espessura de 2 horas.	72
FIGURA 38 – Gráfico de regressão linear para o inchamento em espessura de 24 horas.	72
FIGURA 39 – Gráfico de regressão linear para a absorção de água de 2 horas.	73
FIGURA 40 – Gráfico de regressão linear para a absorção de água de 24 horas.	74
FIGURA 41 – Gráfico de regressão linear para o Módulo de Ruptura.	76

FIGURA 42 - Gráfico de regressão linear para o Módulo de Elasticidade.	76
FIGURA 43 – Gráfico de regressão linear para a adesão interna	78
FIGURA 44 – Corpos de prova de adesão interna rompidos; (a) 0% macadâmia; (b) 70% macadâmia.....	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Composições utilizadas na produção dos painéis de partículas.....	46
TABELA 2 – Teores de extrativos e pH médios do Eucalipto e da casca de noz macadâmia.	68
TABELA 3 – Valores médios dos ensaios físicos realizados para cada tratamento.	69
TABELA 4 – Valores médios dos ensaios mecânicos realizados para cada tratamento.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MDP	– <i>Medium Density Particleboard</i>
OSB	– <i>Oriented Strandboard</i>
HDF	– <i>High Density Fiberboard</i>
MDF	– <i>Medium Density Fiberboard</i>
ABIPA	– Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
MOE	– Módulo de Elasticidade
MOR	– Módulo de Ruptura
UF	– Uréia-formaldeído
TF	– Fenol-formaldeído
PMDI	– Polifenil Polimetileno Diisocianato
FF	– Fenol-formaldeído
MF	– Melamina-formaldeído
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
TAPPI	– <i>Technical Association of the American Pulp and Paper Industry</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Painéis de madeira reconstituída.....	18
3.2. Painéis de partículas de madeira.....	21
3.2.1. Fatores que afetam as propriedades dos painéis de partículas.....	22
3.2.1.1. Densidade.....	22
3.2.1.2. Acidez.....	24
3.2.1.3. Teor de extrativos e teor de umidade.....	25
3.2.1.4. Geometria das partículas.....	25
3.2.2. Processo de produção dos painéis de partículas.....	26
3.2.3. Matérias-primas alternativas para a produção de painéis de partículas.....	30
3.3. Adesivo e adesão.....	32
3.3.1. Fatores que influenciam na qualidade da colagem.....	35
3.3.2. Adesivos utilizados na produção de painéis de partículas.....	36
3.4. Noz macadâmia.....	39
3.4.1. Casca de noz macadâmia.....	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1. Materiais.....	45
4.2. Produção dos painéis.....	46
4.2.1. Geração e classificação das partículas.....	46
4.2.2. Aplicação do adesivo, formação do colchão e prensagem.....	49
4.3. Determinação do teor de extrativos e pH.....	52
4.3.1. Extrativos totais.....	53
4.3.2. Solubilidade em água quente e pH.....	55
4.4. Ensaio físicos.....	57
4.4.1. Teor de umidade.....	57
4.4.2. Densidade.....	58
4.4.3. Inchamento e absorção.....	59
4.5. Ensaio Mecânicos.....	61
4.5.1. Resistência à flexão estática.....	62

4.5.2. Resistência à tração perpendicular ou adesão interna	64
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1. Razão de esbeltez	66
5.2. Teor de extrativos e pH	68
5.3. Ensaio físico	68
5.3.1. Densidade	69
5.3.2. Teor de Umidade	70
5.3.3. Inchamento em Espessura	71
5.3.4. Absorção de Água	73
5.4. Ensaio mecânico	75
5.4.1. Flexão estática	75
5.4.2. Tração perpendicular ou adesão interna (MPa)	78
5.5. Considerações finais	80
6. CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS	82

1. INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro possui grande importância econômica no país, já que o Brasil apresenta uma vasta área de florestas nativas e de reflorestamento. Dentre as espécies de reflorestamento destacam-se o pinus e o eucalipto como sendo as mais plantadas, principalmente pelo fato de possuírem um crescimento mais rápido, adquirido muitas vezes com o melhoramento genético, e também pelo fato do seu caule ter baixa propensão à bifurcações, resultando em toras maiores e mais retilíneas.

Apesar de o Brasil possuir vasta área de florestas, com o passar dos anos percebeu-se a necessidade cada vez maior de racionalização da madeira devido aos aspectos econômico e ambiental, conseguido através do desenvolvimento de novas tecnologias, que além de diminuir a geração de resíduos com a melhor utilização dos recursos florestais, também melhoram algumas de suas propriedades. Com isso começaram a surgir os painéis à base de madeira, dentre os quais se podem citar os compensados, os painéis de partículas, os painéis de fibras, entre outros.

O melhor aproveitamento da tora pode ser visto através dos painéis de partículas e fibras, os quais exigem menores diâmetros de tora para a produção de suas matérias-primas. Destaca-se que os painéis particulados, por exemplo, utilizam mais de 90% de uma mesma tora. Além do mais, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para utilizar também a própria casca da madeira como uma parte da matéria-prima destes painéis, assim como diversos outros tipos de materiais lignocelulósicos.

A utilização destes materiais alternativos como matéria-prima na produção de painéis de fibras e partículas, tem a intenção de diminuir a quantidade de madeira para sua produção, e também dar um uso mais nobre a estes materiais, que normalmente são apenas descartados ou queimados para a geração de energia, provocando, portanto, a sua subutilização. Desta forma pode-se diminuir o consumo da madeira e gerar um aproveitamento de resíduos, contribuindo para um menor impacto ambiental da produção destes painéis sem comprometimento no desempenho dos mesmos.

Como exemplos de materiais lignocelulósicos que vêm sendo pesquisados estão as cascas de cereais, como o arroz e o trigo, cascas de oleaginosas (nozes, castanhas e amêndoas), fibras extraídas de folhas de plantas e resíduos de bagaço de cana, proveniente da indústria sucroalcooleira. Dentre estes materiais encontra-se a noz macadâmia, cuja casca é conhecida como sendo extremamente difícil de ser quebrada, possuindo grande resistência e

densidade, entretanto não se encontra uma utilização para a mesma, sendo apenas descartada como resíduo. Sendo um material que poderia ser transformado em partículas para ser utilizado na produção de painéis.

Este trabalho tem a intenção de produzir painéis de partículas de eucalipto com adição partículas de casca de noz macadâmia, utilizando como adesivo a resina ureia-formaldeído e avaliar o desempenho dos mesmos quanto às recomendações normativas.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal de caracterizar a utilização de partículas de casca de noz macadâmia na produção de painéis particulados de madeira de *Eucalyptus saligna*. Para isso produziu-se painéis com diferentes quantidades da casca.

Os objetivos específicos foram:

- Produzir os painéis de partícula com 0%, 30%, 60% e 100% em massa de partículas de casca de noz macadâmia.
- Realizar os ensaios físicos e mecânicos para a determinação das propriedades dos painéis de partículas produzidos.
- Realizar análise estatística para avaliar a diferença significativa ou não entre os grupos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os painéis à base de madeira podem ser classificados em três grupos principais, dividindo-se em laminados, particulados e de fibras. A revisão de literatura apresentada a seguir descreve aspectos relevantes relacionados ao painel particulado, objeto do presente estudo, de modo a fornecer embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1. Painéis de madeira reconstituída

Uma das razões para o surgimento dos painéis à base de madeira foi o fato dos preços das toras e das tábuas sempre estarem crescendo, com isso foi necessária uma utilização mais eficiente da madeira. Muitos destes painéis podem ser produzidos com o uso de toras com baixo valor agregado devido a diversos defeitos naturais. As serrarias não possuem uma boa eficiência de produção de tábuas, gerando assim cavacos, serragem e outros tipos de resíduos, os quais na maioria das vezes servem apenas para a produção de energia através da queima, mas também poderiam ser utilizados na produção de alguns tipos de painéis à base de madeira (IRLE et. al., 2012).

Além do fator econômico outra desvantagem que pode ser encontrada na madeira é sua alta variabilidade, a qual pode ser diminuída na produção de painéis de madeira, tornando-os um material com propriedades mais homogêneas e estáveis. Sendo assim, apesar de possuírem em alguns casos menor resistência mecânica, são materiais que podem suportar cargas utilizando menores coeficientes de segurança. A partir de então houve uma tendência de utilização de elementos de madeira cada vez menores (IRLE et. al., 2012).

Estão apresentados na Figura 1 os diversos tipos de elementos provenientes da madeira que podem ser utilizados na produção de derivados.



FIGURA 1 – Elementos de madeira (IWAKIRI, 2005).

A medida que os elementos de madeira vão se tornando menores, o produto final e as características do processo de produção são influenciados da seguinte forma: maior formabilidade, decréscimo da relação resistência / peso, aumento da homogeneidade e isotropia e menor exigência quanto à qualidade da matéria-prima. Portanto, a partir destes diversos elementos podem-se gerar novos produtos de madeira através de sua reconstituição. Entre eles encontram-se os painéis à base de madeira, que podem ser definidos como produtos compostos de elementos de madeira como lâminas, sarrafos, partículas e fibras, obtidos a partir da redução da madeira sólida, e reconstituídos através de ligação adesiva (IWAKIRI, 2005).

Gonçalves (2000) classifica os painéis à base de madeira em três grupos principais: lâminas, partículas e fibras. Entre os painéis de lâminas encontram-se a chapa de madeira compensada e a chapa de madeira sarrafeada; entre os produzidos com partículas encontram-se a chapa de madeira aglomerada (MDP), a chapa de flocos orientados (*OSB*) e a chapa de flocos não orientados (*Waferboard*); entre os produzidos com fibras encontram-se a chapa isolante, a chapa dura (*HDF*) e a chapa de média densidade (*MDF*).

Pelo fato das propriedades da madeira variarem entre espécies, entre árvores da mesma espécie e entre partes da mesma árvore, a madeira maciça não pode se igualar aos painéis de

madeira reconstituída em uma série de propriedades que podem ser controladas no processamento (STARK; CAI; CARLL, 2010).

Segundo Machado (2005) os painéis derivados de madeira possuem claras vantagens com relação à madeira maciça, entre elas estão: a possibilidade de obtenção de diferentes tipos e características geométricas, independente da altura, diâmetro e forma do tronco; boa relação resistência/peso; maior estabilidade dimensional; obtenção de produtos mais homogêneos; permite a utilização industrial de madeira proveniente de espécies florestais secundárias; originam uma clara redução de desperdícios de madeira, sendo possível a incorporação de resíduos resultantes da serraria e ainda uma percentagem de casca.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira – ABIPA (2013a) foi realizado um investimento da ordem de US\$ 1,2 bilhões para o período de 2010/2014, fazendo com que a capacidade instalada brasileira das indústrias de painéis de madeira dê um salto de 9,1 milhões de metros cúbicos em 2010 para 10,9 milhões de metros cúbicos anuais em 2014, e afirma também que a produção, em 2011, alcançou 6,4 milhões de metros cúbicos.

É apresentada na Figura 2 a localização das indústrias produtoras de painéis de fibras e partículas no Brasil. Pode-se notar que a sua produção concentra-se basicamente nas regiões sul e sudeste do país, onde também se concentram a maior parte das áreas de reflorestamento.

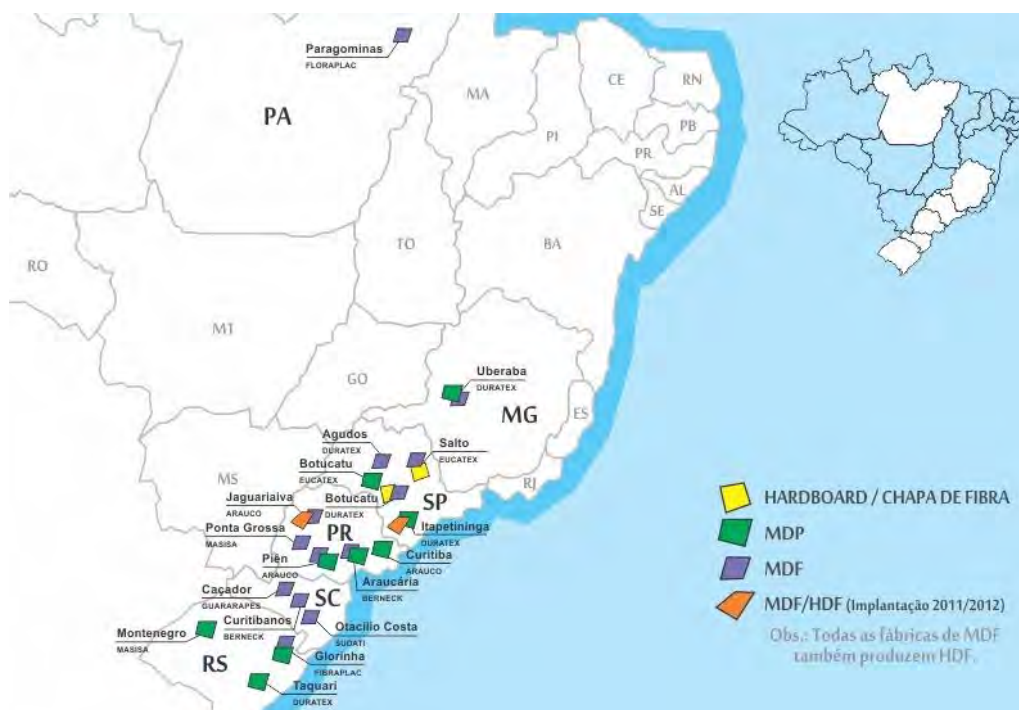


FIGURA 2 – Unidades produtoras de painéis de madeira reconstituída (ABIPA, 2013a).

3.2. Painéis de partículas de madeira

Este produto pode ser definido como sendo um painel produzido com material lignocelulósico, geralmente madeira, na forma de partículas, combinado com uma resina sintética ou outro ligante adequado e unidos sob temperatura e pressão em uma prensa aquecida, por um processo no qual toda a ligação entre as partículas é criada pela resina adicionada (MALONEY, 1993).

É um material isotrópico no plano da chapa, no entanto, pode apresentar valores de resistência na direção paralela à formação do colchão cerca de 10% superiores aos da direção perpendicular (MACHADO, 2005).

Iwakiri (2005), afirma que os painéis de partículas podem ser classificados de acordo com a densidade, tipo de partículas e a distribuição das mesmas no painel.

Densidade: os painéis podem ser classificados em baixa densidade (até $0,59 \text{ g/cm}^3$), média densidade (de $0,59$ a $0,80 \text{ g/cm}^3$) e alta densidade (acima de $0,80 \text{ g/cm}^3$).

Tipo de partículas: com relação às dimensões das partículas podem ser classificados em aglomerados convencionais produzidos com partículas do tipo “sliver”, painéis com partículas do tipo “flake” (“flakeboard”), painéis com partículas do tipo “wafer” (“waferboard”) e painéis com partículas do tipo “strand” (“strandboard”).

Distribuição das partículas no painel: podem ser classificados como painéis homogêneos, painéis de múltiplas camadas e painéis de camadas graduadas. Na Figura 3 está apresentada uma ilustração da distribuição de camadas no painel.

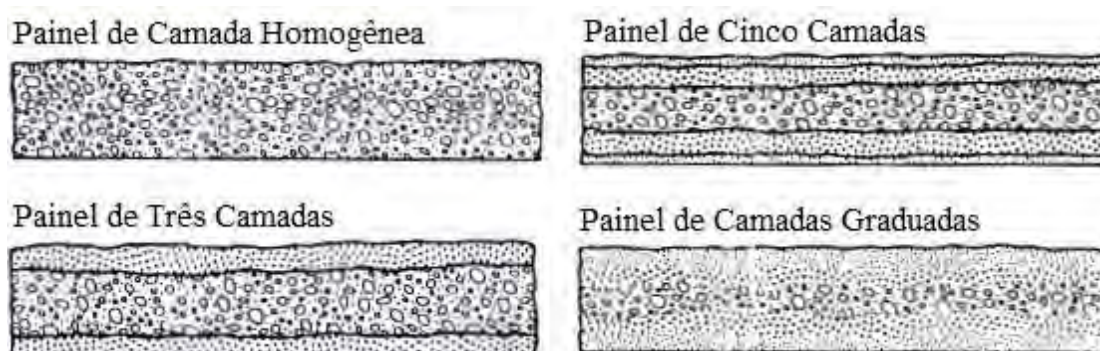


FIGURA 3 – Distribuição de camadas dos painéis de partículas (Adaptado de MOSLEMI, 1974).

Estes painéis são consumidos principalmente pela indústria moveleira, entretanto também é utilizada na construção civil, tais como: pisos residenciais, vigamento de telhados,

divisórias, degraus de escadas e como soalhos para casas (GONÇALVES, 2000). Segundo ABIPA (2013b) cerca de 95% dos painéis de partículas produzidos no Brasil são consumidos pela indústria moveleira, 4% é revendido e os outros 1% são consumidos por outros setores.

3.2.1. Fatores que afetam as propriedades dos painéis de partículas

São muitos os fatores que afetam as propriedades dos painéis de partículas, principalmente os relacionados à matéria-prima e o processo de produção. Entre estes fatores pode-se citar a densidade da madeira e do próprio painel, a acidez, o teor de extrativos, teor de umidade e a geometria das partículas, que serão detalhados a seguir.

3.2.1.1. Densidade

A densidade da madeira é a variável de maior importância quando se trata da sua influência nas propriedades finais do painel, pois a mesma interfere diretamente na densidade do painel produzido, a qual influenciará nas suas propriedades físicas e mecânicas. As partículas de madeira de menor densidade podem ser comprimidas em painéis de média densidade com a garantia de promover um contato suficiente entre as partículas, o qual acarretará em uma boa colagem do painel. Já madeiras com alta densidade não possuem esta mesma característica, pois necessitam de uma maior pressão para atingirem um bom contato entre as partículas, produzindo assim painéis de alta densidade, os quais possuem um custo maior para a produção e são mais pesados. Portanto, partículas de madeira de menor densidade podem produzir painéis de média densidade com as propriedades físicas e mecânicas desejadas. Mas isto pode ser solucionado através da mistura de madeiras de baixa e alta densidade, possibilitando produzir painéis de média densidade com boas propriedades. (MALONEY, 1993).

De acordo com Iwakiri (2005) a razão de compactação, que é a relação entre a densidade do painel e a densidade da madeira, deve ser de no mínimo 1,3 e indica o nível de compressão das partículas, ou seja, o contato existente entre elas. Espécies de menor densidade resultarão em uma razão de compactação maior que espécies com maior densidade,

levando-se em consideração a mesma densidade do painel. Portanto esta razão de compactação é um bom indicativo na escolha da espécie de madeira a ser utilizada na produção do painel.

Pela Figura 4 percebe-se que para uma determinada espécie (densidade da matéria-prima) a resistência à flexão aumenta com o aumento da razão de compactação (densidade do painel/densidade da matéria-prima). Também mostra que para uma mesma densidade do painel ocorre uma diminuição na resistência à flexão com o aumento da densidade da espécie, devido à menor razão de compactação, ou seja, menor contato entre as partículas.

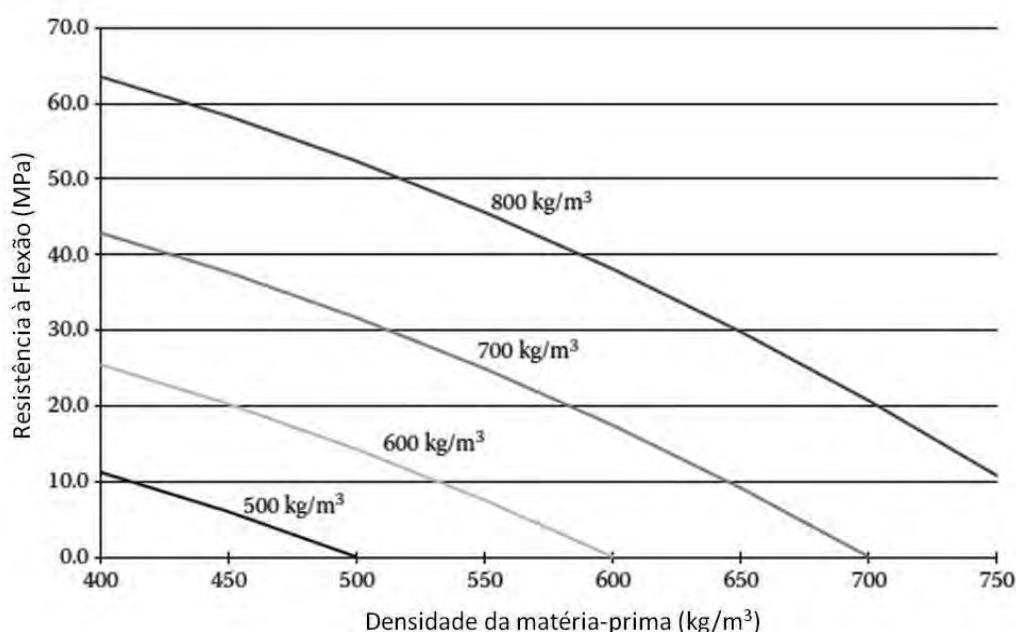


FIGURA 4 – Relação entre a densidade da matéria-prima e a resistência à flexão para quatro densidades do painel de partículas (IRLE et. al., 2012).

Além da massa específica da matéria-prima, a densidade do painel também influencia nas suas propriedades. Em um estudo realizado por Imakiri et. al. (2008) no qual se testou a influência da densidade nas propriedades mecânicas do painel, conclui-se que quanto maior for a densidade do painel maior serão os valores de Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) na flexão estática, conferindo, portanto, maior resistência ao painel. Os gráficos da Figura 5 apresentam os resultados obtidos neste estudo. O gráfico da Figura 5(A) apresentou um coeficiente de determinação $R^2=0,90$, e o gráfico da Figura 5(B) apresentou um coeficiente de determinação $R^2=0,84$, mostrando que existe uma boa correlação entre as propriedades, confirmando que com o aumento da massa específica ocorre também em um aumento no MOE e MOR.

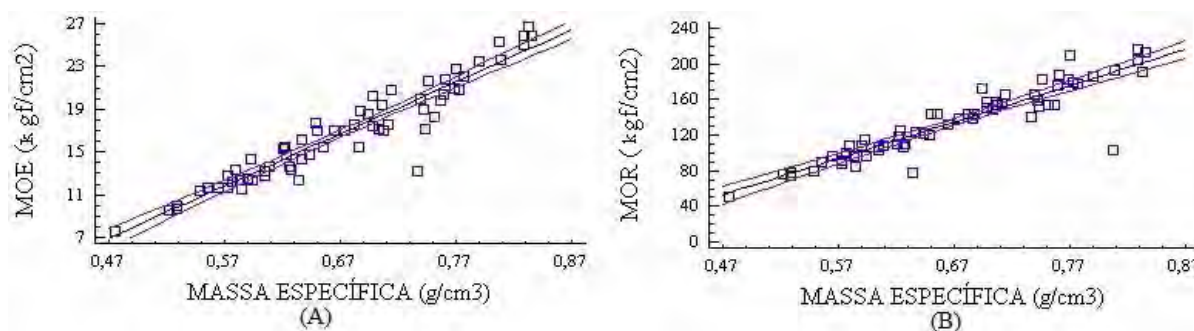


FIGURA 5 – Flexão estática de painéis aglomerados em função da massa específica. (A) MOE x Massa Específica. (B) MOR x Massa Específica (IWAKIRI et. al., 2008).

De acordo com Maloney (1993) a maneira mais fácil e barata de melhorar as propriedades do painel é aumentando a sua densidade, e isto é possível com o aumento do contato entre as partículas, proporcionado pela maior quantidade de madeira presente para suportar cargas mecânicas. E também uma maior densidade do painel requer uma maior “utilização” do adesivo, pois produz um painel com menor quantidade de espaços vazios. Entretanto maior densidade do painel produz um material de manuseio mais difícil e aumento os custos de transporte.

3.2.1.2. Acidez

A acidez da madeira é outro fator que afeta as propriedades e a produção do painel. Ela é medida através do pH, o qual mede o nível específico de atividade ácida da madeira sob determinadas condições, e também através da capacidade tampão, a qual mede a resistência da madeira à mudança do nível de pH (MALONEY, 1993).

O adesivo ureia-formaldeído, que é o mais utilizado na produção de painéis de partículas, pode não curar suficientemente em madeiras com níveis de pH neutros, já em madeiras com pH muito ácido pode ocorrer a pré-cura, que consiste na cura do adesivo durante a prensagem, enquanto as partículas ainda não foram suficientemente prensadas. Em ambos os casos ocorre a formação de uma colagem fraca. Mas o maior problema ocorre em madeiras que possuem alteração inconstante e rápida do nível de pH, necessitando de uma variação do nível do catalisador de acordo com o nível de pH atingido durante o processo, o que acaba se tornando um grande problema a ser controlado na produção (IRLE, 2012).

3.2.1.3. Teor de extrativos e teor de umidade

Outro fator que influencia nas propriedades do painel é o teor de extrativos da madeira utilizada, o qual pode variar de 5 a 30%. A sua influência principal é no consumo de resina e aumento do tempo de cura, diminuição da resistência à umidade do produto final e formação de bolhas durante a prensagem, as quais influenciam a diminuição das suas propriedades mecânicas (IWAKIRI, 2005; MALONEY, 1993).

O teor e a distribuição da umidade no painel também influenciam nas suas propriedades, pois um colchão com umidade maior nas partículas da superfície resultará em um painel com maior densidade na superfície do que no seu interior, ocasionado uma maior dureza e resistência à flexão se comparado a um painel com uma distribuição de umidade homogênea. Entretanto, este mesmo painel possuirá uma menor adesão interna (ligação entre as partículas), devido à baixa densidade formada no seu interior (MALONEY, 1993).

Para a produção do painel é necessário um baixo teor de umidade, pois durante o processo de prensagem à quente o excesso de umidade se converterá em vapor, que no momento da abertura da prensa será liberado repentinamente, podendo causar delaminação e consequentemente a formação de bolhas no painel (IRLE et. al., 2012)

3.2.1.4. Geometria das partículas

Outro fator que influencia nas propriedades dos painéis é a geometria das partículas (comprimento, largura e espessura) e, para se avaliar esta influência utiliza-se a razão de esbeltez, que é a relação entre o comprimento e a espessura das partículas. A geometria das partículas apresenta interações com duas variáveis: a área de contato entre as partículas, ou, área superficial específica das partículas e o consumo relativo de resina, ou, disponibilidade de resina por unidade de área das partículas. Quanto maior o comprimento da partícula (maior razão de esbeltez), maior serão as propriedades de flexão estática. Em contraste, quanto menor o comprimento da partícula (menor razão de esbeltez) menor será a área superficial específica da partícula, havendo maior disponibilidade de resina e aumento nas propriedades de ligação interna (IWAKIRI, 2005).

Irle (2012) também afirma que as partículas mais compridas são as melhores para a maior parte das propriedades dos painéis, entretanto, as partículas de menor comprimento promovem uma melhor qualidade da superfície, maior dureza e maiores propriedades de ligação interna. Devido a isso os fabricantes de painéis utilizam partículas menores na superfície e partículas maiores no centro, na produção dos painéis particulados.

Em um estudo realizado por Arabi, Faezipour e Gholizadeh (2011) no qual foi estudada a redução do teor de resina e da densidade sem afetar as propriedades mecânicas do painel, através do controle do tamanho das partículas, chegou-se as seguintes conclusões:

- A redução do teor de resina e da densidade do painel pode ser compensado pela otimização do tamanho das partículas sem afetar as propriedades do painel de forma negativa;
- A diminuição do teor de resina e da densidade do painel pôde ser compensada através do aumento do comprimento das partículas para se manter constante os valores de Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR).
- As propriedades de ligação interna mostraram-se menores com o aumento da razão de esbeltez e maiores com o aumento da densidade e do teor de resina.

Pode-se então notar que a geometria das partículas influencia diretamente nas principais propriedades mecânicas dos painéis de partículas, portanto o seu controle torna-se essencial para se produzir painéis com as propriedades desejadas.

3.2.2. Processo de produção dos painéis de partículas

Na Figura 6 apresenta-se um esquema geral, com as principais etapas, da produção de painéis de partículas.

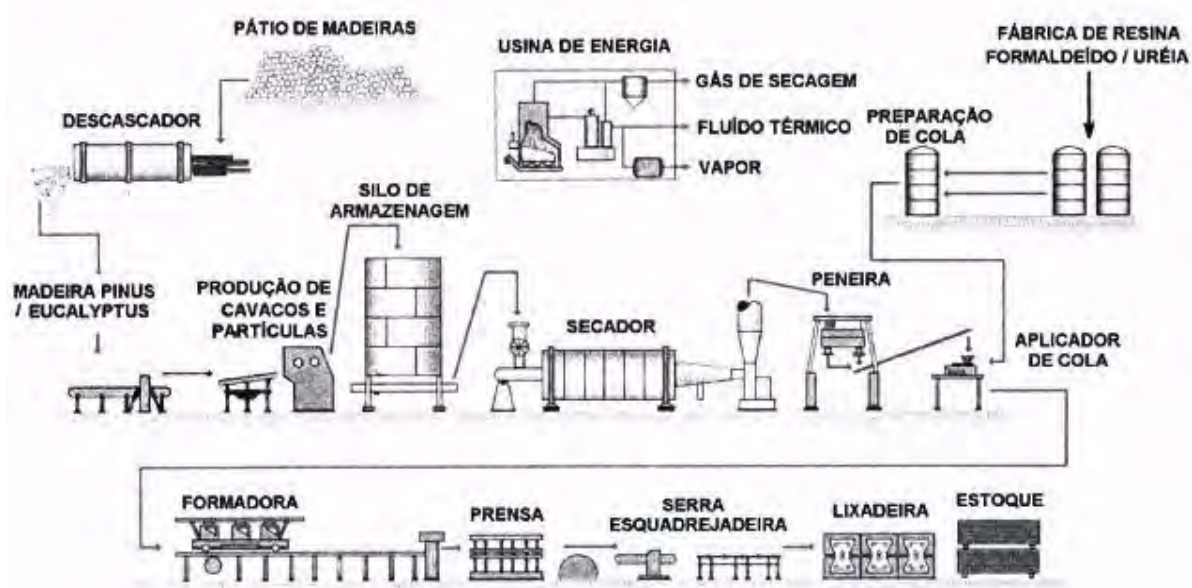


FIGURA 6 – Esquema geral da produção de painéis de partículas (IWAKIRI, 2005).

- Geração de partículas

Esta etapa é de grande importância, pois nela define-se a geometria das partículas. A umidade da madeira tem influência direta na geração das partículas, pois madeiras muito secas resultam em grande geração de “finos” (partículas muito pequenas), enquanto que madeiras saturadas resultam em esmagamento das fibras. A faixa adequada seria entre 35 e 50%, no entanto, este controle torna-se difícil no pátio de toras (IWAKIRI, 2005).

A geração das partículas a partir de toras, utiliza, basicamente, duas etapas. A primeira corresponde a produção dos cavacos, principalmente por picadores de cilindro ou disco, chamados de equipamentos de redução primária. Posteriormente, estes cavacos são levados aos equipamentos de redução secundária, geralmente o moinho de martelo, para a transformação em partículas menores (IRLE et. al., 2012).

- Secagem

Após a geração das partículas, estas devem ser secas até um teor de umidade entre 2% e 8%, para tal os secadores mais comumente utilizados são o de tambor rotativo de uma passagem e o de três passagens (IRLE, 2012).

O tempo de secagem será maior quanto maior for a densidade da madeira, a espessura das partículas e a umidade inicial das partículas e quanto menor for a umidade final das partículas. O tempo de secagem pode variar de 1 a 3 minutos (IWAKIRI, 2005).

- Classificação

A classificação das partículas pode ser realizada de forma mecânica, com a utilização de peneiras e de forma pneumática, ou seja, com a utilização do ar. As peneiras utilizam o princípio da dimensão das partículas para classificá-las, enquanto que os classificadores pneumáticos utilizam o peso das partículas para classificá-las (IWAKIRI, 2005).

Algumas plantas industriais realizam a secagem após a classificação, pois com isso não necessitam secar as partículas que serão descartadas, economizando energia; e também pelo fato de facilitar o controle das variáveis da secagem quando se tem partículas da mesma dimensão a serem secas. Entretanto, a maior parte das plantas industriais realizam a secagem antes da classificação, pois as partículas úmidas tendem a se aglutinar, não permitindo uma classificação muito eficiente e sendo descartadas como se fossem partículas maiores (IRLE, 2012).

- Aplicação do adesivo

O adesivo mais utilizado na produção dos painéis de partículas é a ureia-formaldeído, mas utiliza-se em menor escala o fenol-formaldeído, melamina-formaldeído e o isocianato, variando de acordo com o tipo de aplicação. A quantidade média de adesivo varia de 4% a 10% em relação ao peso seco das partículas, sendo que para painéis de três camadas, normalmente utiliza-se de 8% a 15% para as partículas da face e de 4 a 8% para as partículas do centro (STARK; CAI; CARLL, 2010).

Existem basicamente dois sistemas de aplicação de adesivo: o sistema de aplicação por rolos e o sistema de aplicação por atomização, o qual é o mais utilizado pelas indústrias, pois apresenta uma maior uniformidade de aplicação do adesivo sobre a superfície das partículas. No sistema de atomização o adesivo é pulverizado por bicos localizados no interior de um cilindro, mas para que a aplicação seja eficiente é necessário o controle da viscosidade do adesivo na faixa de 250 a 300 cp e a regulagem adequada da pressão nos bicos, para assegurar um fluxo uniforme de aplicação (IWAKIRI, 2005).

- Formação do colchão:

A formação do colchão é o processo de deposição das partículas com adesivo sobre uma esteira móvel, em quantidade pré-determinada em função da densidade e espessura do painel. O equipamento formador do colchão é chamado de estação formadora, nele há um reservatório onde é dosado o material que vai para o sistema de distribuição sobre a esteira móvel (IWAKIRI et al., 2005).

Esta etapa deve ser executada de forma que a deposição das partículas seja feita uniformemente em relação ao comprimento e largura do painel, na quantidade necessária, para que com isso se atinja a densidade pré-determinada, e para que o perfil de densidade seja simétrico com relação ao centro da chapa. A formadora do colchão possui basicamente duas maneiras de formação do colchão: a descontínua e a contínua, sendo que esta última é a mais utilizada em plantas industriais modernas (IRLE, 2012).

- Pré-prensagem

De acordo com Stark, Cai e Carll (2010) a pré-prensagem promove a redução da altura do colchão e ajuda a consolidá-lo para que, posteriormente, seja realizada a prensagem.

Maloney (1993) afirma que após a formação do colchão e antes da prensagem à quente, necessita-se realizar a pré-prensagem, com o intuito de se retirar a maior quantidade possível de ar existente entre as partículas. Para isto é utilizado um equipamento conhecido como pré-prensa, que consiste na aplicação de pressão através de uma esteira perfurada, fazendo com que o ar seja expulso, facilitando assim a prensagem e evitando defeitos. O controle da pré-prensa é efetuado através da abertura de quatro pistões, sendo dois na entrada e dois na saída.

- Prensagem

Após a pré-prensagem, o painel vai para a prensa a quente, que tem como objetivo a cura da resina, a classificação e consolidação do colchão até a espessura final do painel. Os parâmetros do ciclo de prensagem de acordo com Iwakiri et al. (2005) são:

- **Pressão:** tem as funções de densificação e consolidação do material, até atingir a espessura final do painel. A pressão aplicada pode variar na faixa de 12 a 40 kgf/cm², em função do grau de densificação do material;
- **Temperatura de prensagem:** tem a função de processar a polimerização e cura da resina, e de plasticização da madeira, reduzindo a resistência da madeira à compressão e facilitar a consolidação do colchão até a espessura final do painel. A temperatura de prensagem depende do adesivo utilizado. Maloney (1993) diz que para o adesivo fenol-formaldeído a temperatura pode variar de 182 a 204°C, enquanto que para o adesivo ureia-formaldeído esta temperatura é de em média 143°C.
- **Tempo de fechamento da prensa:** é o momento desde o contato dos pratos quentes da prensa com a superfície do colchão até atingir a espessura final do painel. Está relacionado com a formação do gradiente vertical de densidade do painel;

- **Tempo de prensagem:** deve ser suficiente para que o centro do painel atinja a temperatura necessária para a cura da resina, está em função da espessura da chapa, umidade do colchão e temperatura de prensagem. Para Irle et. al. (2012) por questões econômicas a prensagem do painel de partículas, industrialmente, deve ser de 1 a 5 minutos, mas o adesivo deve possuir um *gel time* (tempo decorrido desde o preparo do adesivo até a sua cura) de em média 20 a 30 minutos, para que não haja uma pré-cura antes ou durante a prensagem.

- Acabamento:

Após a prensagem os painéis são esquadrejados para se obter a largura e comprimentos desejados e deixar as bordas retas, nesta etapa pode-se perder cerca de 0,5% até 8% do volume de painel. Após o esquadrejamento os painéis são lixados ou aplainados para posterior empacotamento e transporte. Podem também ser laminados ou revestidos com algum outro material, ou até mesmo pintados (STARK; CAI; CARLL, 2010).

De acordo com Irle et. al. (2012) o lixamento é feito para remover superfícies onde houve pré-cura do adesivo, pois são mais fracas, fibrosas e porosas, para calibrar a espessura dos painéis e melhorar a qualidade da superfície para aplicações subsequentes de laminação, pintura, aplicação de verniz, entre outras.

3.2.3. Matérias-primas alternativas para a produção de painéis de partículas

Além da madeira outros materiais vêm sendo estudados para a produção de painéis de partículas, tanto na substituição total como na substituição parcial da madeira. Estes materiais normalmente são obtidos de resíduos de processos industriais, florestais ou agrários, sendo, portanto, uma boa alternativa para um melhor aproveitamento de resíduos, que muitas vezes são descartados de forma incorreta, não possuem um destino adequado e nenhum valor agregado.

Garcia-Ortuño et. al. (2011) produziram painel de partículas de Cana do Reino (*Arundo donax* L.) com diferentes tamanhos de partículas e adesivo ureia-formaldeído, obtendo valores de MOE e MOR equivalentes e em alguns casos bem superiores aos mínimos exigidos pela EN 312 para usos gerais e produção de móveis, o mesmo desempenho foi observado para os valores de ligação interna. Segundo os autores os resultados obtidos mostram que é

perfeitamente possível a produção de painéis até de alta qualidade de Cana do Reino como matéria-prima lignocelulósica alternativa.

Em um estudo realizado por ZHENG et. al. (2007) foi utilizada uma espécie de capim alto “Jose Tall Wheatgrass” (*Agropyron elongatum*) na produção de painéis particulados com adesivo ureia-formaldeído (UF) e polifenil polimetileno isocianato (PMDI). Constatou-se que os painéis produzidos com PMDI, mais especificamente os com densidades iguais ou superiores a $0,73 \text{ g/cm}^3$, apresentaram MOE, MOR e ligação interna superiores aos mínimos exigidos pela norma americana ANSI/A208.1. Os autores concluíram que o capim “Jose Tall Wheatgrass” mostrou-se adequado à produção de painéis de partículas colados com adesivo PMDI, no entanto o adesivo UF não apresentou resultados satisfatórios.

A fibra de babaçu (*Orbignya* spp.) também foi utilizada como material alternativo em associação com partículas de *Pinus elliotti* em um estudo realizado por Lima et. al. (2006), no qual se variou a porcentagem de fibra de babaçu em 10, 20 e 30%, utilizando-se adesivo UF. Os resultados mostraram que não houve diferença significativa na adição de fibra de babaçu, mesmo a de 30%, nas propriedades mecânicas se comparados com os painéis produzidos com 100% de *Pinus elliotti*. Mostrando que até 30% podem-se substituir as partículas de *Pinus* pelas de Babaçu sem afetar as propriedades da chapa.

Melo et. al. (2009) adicionaram porcentagens de casca de arroz a painéis de partículas de *Eucalyptus grandis*, com adesivo UF e tanino-formaldeído (TF), entretanto tanto os resultados físicos quanto os mecânicos não se apresentaram satisfatórios, pois conforme aumentou-se a quantidade de casca de arroz, diminuiu-se as propriedades dos painéis. Mas segundo o autor ainda é possível a substituição de até 10% das partículas de madeira por partículas de casca de arroz, obtendo-se propriedades similares às dos painéis produzidos somente com madeira.

Em um estudo realizado por Colli et. al. (2010) foi adicionado fibra de coco, nas porcentagens de 10, 20 e 30%, em painéis de madeira de Paricá (*Schyzolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) com adesivo UF. Constatou-se que não houve diferença significativa nas propriedades de MOE, dureza Janka e na resistência ao arrancamento de parafuso com o aumento da porcentagem de casca de coco, mas houve um aumento no MOR. Entretanto com o aumento da porcentagem de casca de coco houve uma diminuição nas propriedades de ligação interna. Segundo os autores a casca de coco pode ser uma boa matéria-prima alternativa em adição às partículas de madeira par a produção de painéis de partículas.

Biswas, Bose e Hossain (2011) produziram painéis de partículas com resíduos (cavacos e maravalha) de duas espécies de Bambu, *Bambusa balcooa* e *Bambusa vulgaris*, com

adesivo UF. Os painéis produzidos com partículas provenientes de cavacos apresentaram propriedades físico-mecânicas superiores àqueles produzidos com partículas de maravalha, mostrando que a geometria da partícula possui grande influência nas propriedades dos painéis. É importante notar que segundo os autores todos os painéis produzidos apresentaram propriedades de acordo com as normas internacionais, podendo então ser utilizado para a produção de painéis de partículas de boa qualidade. Entretanto ambas as espécies produziram painéis com baixa estabilidade dimensional, devendo ser utilizado apenas em ambientes internos livres de umidade.

Em um estudo realizado por Pirayesh e Khazaeian (2012) foram produzidos painéis de uma mistura de partículas de folhosas com porcentagens de casca de amêndoa (*Prunus amygdalus* L.), utilizando UF como adesivo. A adição de casca de amêndoa no painel de partículas de madeira promoveu um aumento na resistência à água do painel, entretanto as propriedades mecânicas diminuíram com a adição, sendo possível apenas a substituição de até 30% das partículas de madeira pelas partículas da casca para estar em conformidade com as exigências normativas das propriedades mecânicas. Gürü, Tekeli e Bilici (2006) também utilizaram casca de amêndoa para produzir um painel de partículas com adesivo ureia-formaldeído, obtendo um material homogêneo, e que segundo os autores pode ser produzido como uma alternativa de material sustentável e de aproveitamento de resíduos.

3.3. Adesivo e adesão

Os adesivos têm a função de transferir e distribuir cargas entre os componentes a serem colados, com isso aumentando a resistência e a rigidez dos produtos de madeira (FRIHART; HUNT, 2010). De acordo com Iwakiri (2005, p.3) “o adesivo é um material com propriedades aderentes, ou seja, é uma substância capaz de manter unidos outros materiais em suas superfícies”.

Um material aderente é um material que entrando em contato com outro sofre a ação de um fenômeno chamado de adesão que de acordo com Iwakiri (2005, p.4) “é um fenômeno físico-químico que provê um mecanismo de interação entre superfícies sólidas e uma segunda fase, que consiste de partículas individuais como moléculas, pequenas gotas, pó, etc., ou ainda de uma película contínua, líquida ou sólida”. A adesão envolve fatores mecânicos e químicos

que juntos controlam a habilidade do adesivo de unir duas superfícies de madeira (FRIHART; HUNT, 2010).

Existem basicamente três passos no processo da colagem com adesivo. O primeiro consiste da preparação da superfície para garantir uma melhor interação entre o adesivo e o substrato, podendo envolver um tratamento mecânico ou um tratamento químico ou até mesmo ambos. Mas em alguns casos esta preparação não se faz necessária. O segundo passo é aquele que o adesivo precisa para formar uma interação em nível molecular com a superfície do substrato, influenciado pela capacidade de deformação e fluidez do adesivo, e também pelos componentes polares e apolares tanto do adesivo quanto do substrato. O terceiro passo é a cura do adesivo, a qual envolve a sua secagem e solidificação. Na maior parte dos adesivos para madeira a cura ocorre por polimerização ou perda de solvente (FRIHART, 2012).

De acordo com Iwakiri (2005) os mecanismos que envolvem o processo de adesão podem ser explicados simplificadaamente pelas seguintes teorias:

- Teoria mecânica: o adesivo penetra em um substrato poroso, neste caso a madeira, formando “ganchos” que solidificam no momento da cura do adesivo. Frihart e Hunt (2010) afirmam que este processo mecânico torna-se efetivo, quando o adesivo penetra além da superfície da madeira e chega a infiltrar-se na microestrutura da parede celular, aumentando assim a resistência dos “ganchos” formados e a superfície de contato entre o adesivo e a madeira. Quanto mais profunda for a penetração do adesivo maior será a durabilidade e a resistência à água da ligação.

- Teoria da difusão de polímeros: segundo esta teoria a adesão ocorre também através da difusão de cadeias de polímeros (adesivo) em nível molecular, ou seja, é a difusão de cadeias de polímeros uma sobre as outras, facilitando o escoamento do adesivo.

- Teoria da adesão química: neste caso a adesão ocorre através de ligações iônicas ou covalentes (ligações primárias), e/ou por forças intermoleculares (ligações secundárias). De acordo com Frihart e Hunt (2010) embora as ligações covalentes possam ocorrer entre a madeira e alguns adesivos, não existem evidências que elas contribuam para a resistência da colagem. Entretanto as forças intermoleculares de Van der Waals, dipolo-dipolo e ligações de hidrogênio ocorrem tão frequentemente que devem ser muito importantes para a resistência da colagem, especialmente devido a grande área de contato entre o adesivo e a madeira. Frihart (2012) afirma que a mais forte das ligações secundárias são as ligações de hidrogênio, e são

também as que mais comumente ocorrem devido aos grupos hidroxila, e em alguns casos carboxila e éster, contidos em abundância tanto na madeira quanto nos adesivos, promovendo uma grande quantidade de ligações de hidrogênio. Entretanto estas ligações são facilmente quebradas por moléculas de água, mostrando o porquê que em ambientes úmidos a colagem perde um pouco da sua resistência.

Para que uma colagem seja realizada o adesivo necessita umectar e fluir sobre a superfície do substrato e em alguns casos, como o da madeira, necessita penetrá-lo. As formas de interação entre o adesivo e a madeira são a umectação, a fluidez e a penetração do adesivo na madeira. A umectação é habilidade que uma gota do adesivo possui de formar um pequeno ângulo de contato com a superfície do substrato, e pode ser melhorada através da remoção de componentes oleosos presentes na superfície por processos químicos ou mecânicos (Figura 7). A fluidez envolve o escoamento do adesivo sobre a superfície em um certo tempo, esta é uma característica importante, pois quanto maior a fluidez mais a superfície é coberta pelo adesivo resultando em uma colagem mais forte. Assim um adesivo muito viscoso pode umectar uma superfície, entretanto ele pode não fluir para cobrir a superfície em um tempo razoável. A penetração do adesivo na madeira envolve a capacidade que o adesivo possui de entrar pelos vazios da superfície (que podem ser os lumens) ou penetrar na própria parede celular. Quando a penetração é muito baixa o adesivo não penetra suficientemente na madeira para garantir uma forte interação madeira – adesivo, quando a penetração é muito alta a linha de cola não permanece com adesivo suficiente para ligar as superfícies a serem coladas, resultando na chamada “linha de cola faminta” (FRIHART, 2012).

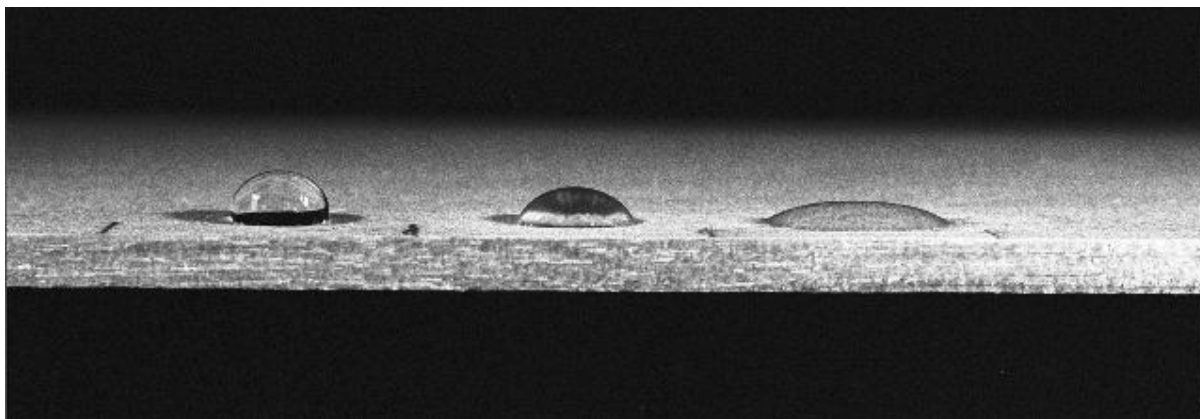


FIGURA 7 – Gotas de água na superfície de uma lâmina de madeira após 30 segundos mostrando a diminuição do ângulo entre a gota e a madeira. A gota da esquerda está sobre uma superfície não tratada, a do meio sobre uma superfície onde houve duas passadas de lixa 320, a da direita sobre uma superfície com quatro passadas da lixa 320 (FRIHART, 2012).

3.3.1. Fatores que influenciam na qualidade da colagem

De acordo com Iwakiri (2005) as características físico-químicas do adesivo que influenciam na qualidade da colagem são:

- Viscosidade: quando muito alta resulta em dificuldade de espalhamento, ou seja, baixa fluidez, condições desfavoráveis de umectação e menor penetração do adesivo na madeira, reduzindo a formação de “ganchos” e de ligações de hidrogênio, promovendo uma linha de cola mais espessa e qualidade de colagem inferior. Quando muito baixa aumenta em demasia a penetração na madeira, formando a chamada linha de cola “faminta”, o que também promove uma baixa qualidade de colagem.

- Tempo de gelatinização (*gel time*): corresponde ao tempo que vai da preparação do adesivo até o seu endurecimento após a aplicação. Relaciona-se com a máxima viscosidade admissível para a sua aplicação e com a reatividade do adesivo, que influenciarão no tempo de prensagem.

- Teor de substâncias sólidas: o adesivo é composto por parte líquida e parte sólida. A parte líquida evapora para que ocorra a cura do adesivo, restando apenas a parte sólida a qual realiza a colagem do material e distribui as tensões. O teor de substâncias sólidas influencia então diretamente na qualidade da colagem.

- pH: influencia tanto na madeira quanto na resina, um pH muito baixo provoca a formação de espuma prejudicando a aplicação do adesivo. O pH do adesivo deve ser definido de acordo com o pH da madeira, pois alguns adesivos curam em meio ácido, enquanto outros curam em meio básico.

Existem alguns fatores da madeira que podem influenciar na colagem. Frihart e Hunt (2010) citam três fatores principais.

O primeiro é a superfície das peças de madeira, que deve ser lisa, aplainada e livre de marcas de usinagem ou outras irregularidades, incluindo “batidas” de plaina, partes esmagadas, farpas e fibras soltas. Portanto, as condições físicas e químicas das superfícies são extremamente importantes para um resultado satisfatório, pois a colagem por adesivos consiste na união de superfícies.

O segundo é a densidade e a porosidade da madeira. Madeiras de alta densidade possuem um grau de dificuldade de colagem mais elevado se comparadas às de baixa densidade, pois possuem parede celular mais espessa e lúmen celular menor, dificultando a penetração do adesivo. Com relação à porosidade ocorre o mesmo, madeiras menos porosas tem maior resistência à penetração do adesivo que madeiras mais porosas, portanto possuem uma colagem de menor resistência.

O terceiro fator é a umidade da madeira que afeta o escoamento e a capacidade de penetração do adesivo, sendo que o valor ideal encontra-se entre 6 e 14%. Teores de umidade muito baixos reduzem o escoamento e a penetração do adesivo na madeira, prejudicando a resistência da colagem, enquanto umidades altas normalmente permitem ao adesivo uma penetração excessiva para o interior da madeira, resultando em uma linha de cola pobre, reduzindo sua resistência.

3.3.2. Adesivos utilizados na produção de painéis de partículas

De acordo com Frihart e Hunt (2010) os adesivos de madeira, têm origem em polímeros naturais ou sintéticos, sendo que os naturais vêm sendo substituídos pelos sintéticos, mas mesmo assim continuam sendo utilizados. Os adesivos sintéticos podem ser divididos em adesivos termoplásticos e termorígidos:

- Adesivos termoplásticos: são formados por longas cadeias de polímeros que amolecem e fluem com a presença de calor, e voltam a endurecer quando resfriados, têm menor resistência ao calor e a umidade se compara aos adesivos termoendurecedores. Entre estes adesivos estão o PVA e o “*Hot-melt*”.

Adesivos termorígidos: estes adesivos possuem excelentes propriedades estruturais, pois sofrem modificação química irreversível quando curados (processo no qual ocorre a secagem final do adesivo) e quando reaquecidos não amolecem e escoam novamente. Podem possuir alta rigidez, alta resistência a umidade e são rígidos o suficiente para suportar altas cargas sem deformar. Alguns exemplos de adesivos termoendurecedores são o fenol-formaldeído, a ureia-formaldeído, a melamina-formaldeído, o resorcinol-formaldeído e o isocianato.

Os adesivos podem ser agrupados nas categorias estruturais, semi-estruturais e não estruturais. Estas categorias são definidas a partir do uso externo e interno (FRIHART e

HUNT, 2010), mas podem também ser classificados em relação a sua permanência e durabilidade. A permanência do adesivo é analisada sob condições ambientais irreversíveis, enquanto, a durabilidade refere-se às condições ambientais reversíveis (FRIHART, 2012).

O adesivo mais comumente utilizado na produção de painéis de partículas é a ureia-formaldeído, seguido da melanina-formaldeído e do fenol-formaldeído (IRLE, 2012). O poliisocianato também é um adesivo interessante para a produção de painéis de partículas, mas é pouco utilizado (MALONEY, 1993). A seguir serão apresentadas algumas das características destes principais adesivos.

- Ureia-formaldeído (UF): esta resina possui alguns pontos positivos como: custo muito baixo, não inflamável, taxa de cura muito rápida e cor clara, no entanto, a colagem não resistente a água (FRIHART, 2012). O seu baixo custo se deve ao fato de que sua matéria-prima principal consiste apenas em ureia e formaldeído, não contendo benzeno ou componentes aromáticos (BALDWIN, 1995). Stark; Cai e Carll (2010) afirmam que dentre os adesivos termoendurecedores a ureia-formaldeído é o mais barato, e a vantagem de possuir cor clara é que pode ser utilizada em produtos decorativos, já que a cor clara é um requisito para a produção deste tipo de produto.

Cerca de 90% dos painéis de madeira produzidos no mundo utilizam a resina ureia-formaldeído, no entanto os mesmos não possuem condições ideais para ambientes úmidos (MALONEY, 1993). Recomenda-se que painéis colados com este tipo de adesivo não sejam utilizados onde há a necessidade de exposição ao tempo e às temperaturas elevadas (BALDWIN, 1995).

A cura da resina ocorre sob condições ácidas. Esta acidez pode ser atingida através da utilização de catalisadores, ou ainda pela acidez da própria madeira ou também pela combinação das duas. Os catalisadores comumente utilizados são o sulfato de amônia ou cloreto de amônia (MALONEY, 1993; FRIHART, 2012).

Para a cura do adesivo necessita-se de uma temperatura de, em média, 100°C no centro da chapa, para que tal temperatura seja conseguida os pratos da prensa devem ser aquecidos de 149°C a 188°C (MALONEY, 1993).

As resinas UF são produzidas em solução aquosa, com teor de sólidos entre 60 e 70%, apresentam coloração branca leitosa, pH na faixa de 7,4 a 7,8 e viscosidade na faixa de 400 a 1000 cP à 25°C (IWAKIRI, 2005).

- Fenol-formaldeído (FF): é um adesivo tipicamente utilizado na produção de compensado e OSB para a construção civil, devido principalmente a grande exposição à água que esta aplicação possui, pois é um adesivo que possui a habilidade de manter estáveis as

propriedades mecânicas e dimensionais do compósito sob condições de umidade (STARK; CAI; CARLL, 2010). Possui excelente durabilidade devido a sua boa adesão à madeira, a alta resistência do polímero e a excelente estabilidade do adesivo (FRIHART, 2012). Entretanto o seu custo é relativamente alto, sendo em média de 2,5 vezes mais que o adesivo ureia-formaldeído (IWAKIRI, 2005).

Outra vantagem deste adesivo é a sua estabilidade ao calor, porém se comparado ao adesivo UF possui um custo maior, o tempo de cura do painel produzido é maior e a temperatura necessária na prensagem também é maior, necessitando ser de 121°C a 149°C no centro da chapa, para isso o prato da prensa deve ser aquecido, em média, até 200 °C (MALONEY, 1993).

De acordo com Iwakiri (2005) o adesivo FF apresenta coloração marrom avermelhado, teor de sólidos entre 48 e 51%, pH na faixa de 11 a 13 e viscosidade de 300 a 600 cP.

- Melamina-formaldeído (MF): o adesivo Melamina-formaldeído apresenta boa resistência à água, por isso é mais comumente utilizado na produção de compensados e de painéis de partículas de uso exterior e semi-exterior, entretanto o seu custo é elevado devido à melamina (FRIHART, 2012).

Apresenta coloração branca leitosa e com as vantagens de possuir maior resistência à umidade que a resina UF e cura mais rápida em relação à resina FF. No entanto seu custo é de 3 a 4 vezes mais elevado que o da UF e de 20 a 25% mais elevado que a FF (IWAKIRI, 2005).

Stark, Cai e Carll (2010) e Baldwin (1995) afirmam que a resina MF pode ser utilizada em conjunto com a UF, quando, se necessita de um adesivo que seja imperceptível, devido à cor clara e quando se necessita de usos exteriores, pois a MF aumenta a resistência à água da UF, quando utilizadas em conjunto. Maloney (1993) diz que pode-se fortificar o adesivo UF com uma quantidade de até 20% de MF.

- Isocianato (MDI ou PMDI): Os adesivos baseados em polifenil polimetileno isocianato e difenil metileno di-isocianato possuem alta resistência na colagem, são livres de formaldeído, e podem curar em altas temperaturas e em temperaturas ambientes (BALDWIN, 1995). São utilizados como uma alternativa para o FF, principalmente para painéis aglomerados (STARK; CAI; CARLL, 2010; IWAKIRI, 2005).

A alta resistência da colagem é devido às fortes ligações formadas entre as hidroxilas da madeira e o adesivo. Tais ligações possuem boa resistência à água e a ácidos diluídos. Trabalha muito bem em matérias difíceis de colar como a palha. A principal desvantagem

deste adesivo é o seu custo mais elevado entre os adesivos mais comumente utilizados, mas que pode ser compensado por economias realizadas em outras etapas do processo de produção (MALONEY, 1993).

3.4. Noz macadâmia

A noz macadâmia é proveniente de uma árvore que, popularmente, leva o mesmo nome, Macadâmia (Figura 8), a qual pertence à família Proteaceae. É uma planta nativa da Austrália e existem quatro espécies distintas mais conhecidas, mas apenas duas são comerciais a *Macadamia integrifolia* Maiden & Betche, a qual é a mais comumente cultivada, e a *Macadamia tetraphylla* L. (NAGAO, 2011; SOBIERAJSKI et. al., 2006).



FIGURA 8 – Árvore de macadâmia (França, 2007).

De acordo com França (2007) a nogueira macadâmia é uma árvore frondosa com um bom desenvolvimento atingindo mais de 10m de altura, podendo chegar a até 19m com o diâmetro da copa de 13m segundo Nagao (2011), o qual pode alcançar até 15m conforme Stephenson (2003). França (2007) ainda diz que a nogueira macadâmia possui folhas verde-escuras, com 10 a 30 centímetros de comprimento e as suas flores nascem em cachos, nos quais vingam de um até no máximo vinte frutos (nozes).

O fruto (Figura 9) é um folículo deiscente composto pelo pericarpo ou carpelo, o qual se abre em um dos lados ao amadurecer, pela casca e pelo núcleo, o qual corresponde à noz comestível. A casca se desenvolve a partir do tegumento, parte externa do núcleo, e é composta por células de parede espessa que o envolvem (FRANÇA, 2007; NAGAO, 2011). Segundo Small (2011) a noz com casca possui diâmetro de 2,5 cm, em média, e para quebrá-la necessita-se da aplicação de uma força de compressão de 140 kgf/cm^2 , portanto as fábricas necessitam de equipamentos específicos para a realização deste procedimento.

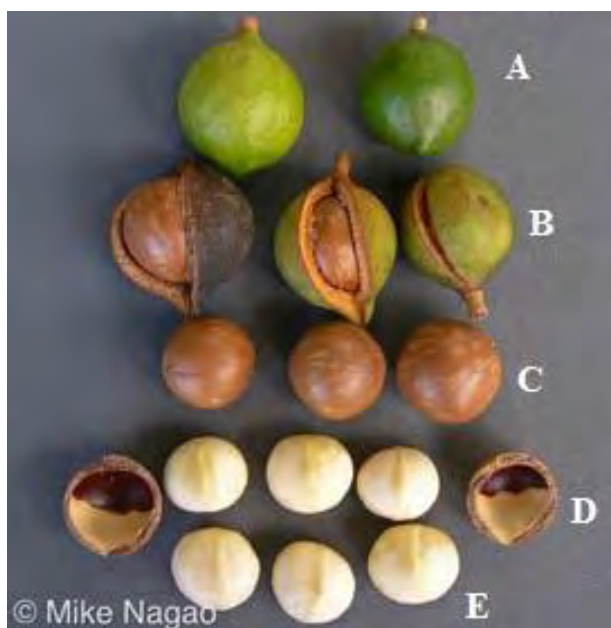


FIGURA 9 – Fruto da macadâmia. (A) Fruto envolto pelo pericarpo, casca externa verde; (B) Rompimento do pericarpo, amadurecimento do fruto; (C) Noz com casca; (D) Casca que envolve o núcleo; (E) Núcleo comestível (NAGAO, 2011).

Os maiores produtores mundiais de macadâmia são: Austrália, Havaí, África do Sul, Quênia, Malaui, Guatemala, Brasil, Costa Rica e Zimbábue (NAGAO, 2011). No gráfico da Figura 10 está apresentada a produção mundial média da noz macadâmia dos anos de 2006 a 2011. Neste contexto, o Brasil se apresenta entre os maiores produtores de macadâmia do mundo, com isso produzindo também uma grande quantidade de casca, a qual pode não possuir um aproveitamento adequado, gerando mais resíduos.

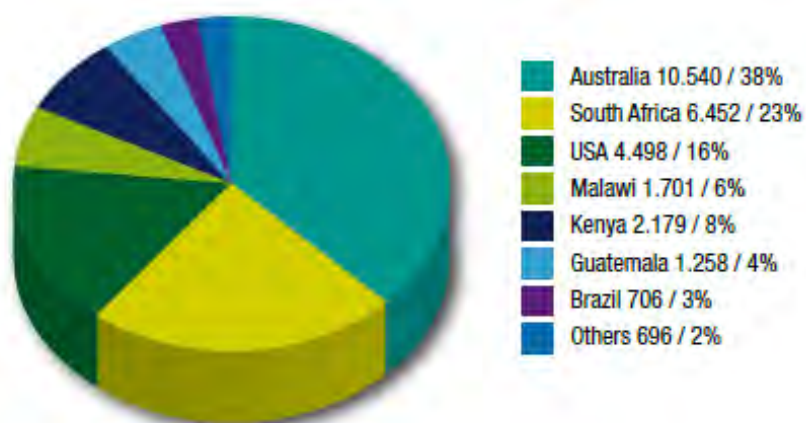


FIGURA 10 – Produção mundial média de noz macadâmia dos anos de 2006 a 2011 em toneladas (INTERNATIONAL NUT & DRIED FRUIT, 2010).

Segundo França (2007) esta noz vem sendo cultivada em vários estados brasileiros, destacando-se as áreas do estado de São Paulo (33%), Espírito Santo (31%), Bahia (18%) e Rio de Janeiro (10%). O estado de São Paulo, portanto é o maior produtor desta noz, na Figura 11 está apresentada a produção da noz por cidade, sendo que os maiores produtores são as cidades de Dois Córregos, Mineiros do Tietê, Avaré, Indaiatuba, Buri, Sales Oliveira e São Sebastião da Gramma.

O pericarpo e a casca correspondem à maior parte do peso da noz macadâmia. O pericarpo corresponde a 50% do peso, enquanto à casca de 25 a 35% e a noz comestível a apenas 15% do peso em média (SMALL, 2011). Com isso pode-se notar que com a produção brasileira média de noz macadâmia de 706 toneladas por ano, apresentada na Figura 10, o país produz cerca de 176,5 a 247,1 toneladas de casca de noz macadâmia por ano, a qual não possui um aproveitamento, sendo descartada apenas como resíduo.

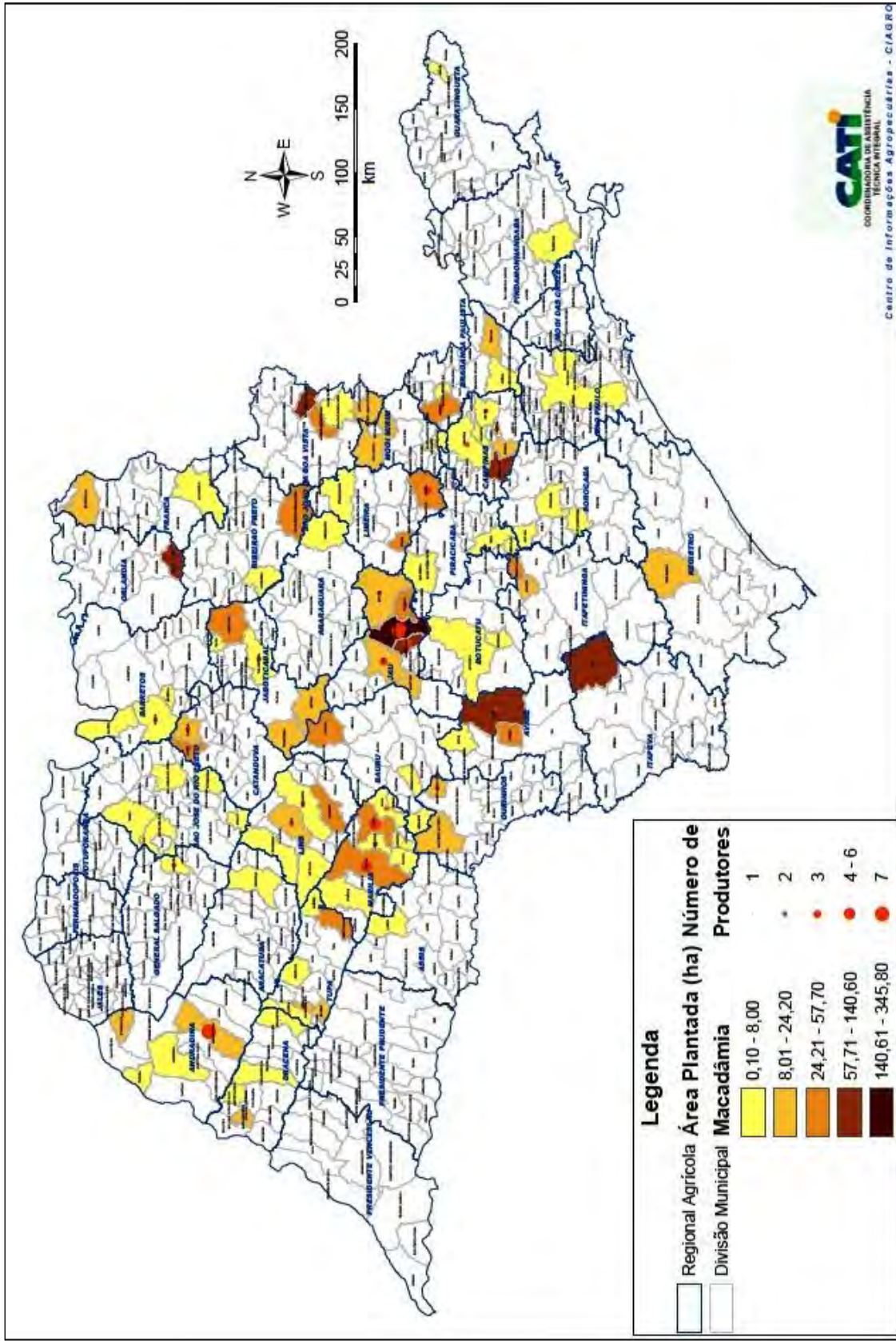


FIGURA 11 – Regiões produtoras de noz macadâmia no estado de São Paulo (COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL – CATI, 2009).

3.4.1. Casca de noz macadâmia

A casca da noz macadâmia se comporta como uma madeira isotrópica, com densidade seca de em média $1,3 \text{ g/cm}^3$, dureza Vickers de $180 \pm 30 \text{ MPa}$, a força de ruptura na compressão de 25 a 80 MPa, e módulo de elasticidade variando de 2000 a 6000 MPa, valores estes que são correspondentes ou até maiores que as madeiras mais utilizadas. Mas levando-se em consideração a força e o módulo de elasticidade específicos, ou seja, divididos pela densidade, a macadâmia torna-se menos favorável devido a sua densidade muito elevada se comparado à madeira. Entretanto, os seus valores de Dureza Vickers são os mesmos apresentados pelo alumínio puro, o qual possui duas vezes a sua densidade. (JEHNNINGS; MACMILLAN, 1986).

A casca é composta por feixes irregulares e aleatoriamente orientados, com dezenas ou centenas de células. Dentro destes feixes, as células, que possuem na sua maioria formato elíptico, estão agrupadas de forma quase paralela e que ocupam todo o espaço. Cada célula consiste de um núcleo variando de 5 a 25 μm , cercado por várias camadas concêntricas, no total cada célula pode chegar até 50 μm de diâmetro e de 0,1 a 1,5 mm de comprimento. Na Figura 12 estão apresentadas as células que formam à casca (WANG; MAI, 1994; JEHNNINGS; MACMILLAN, 1986).

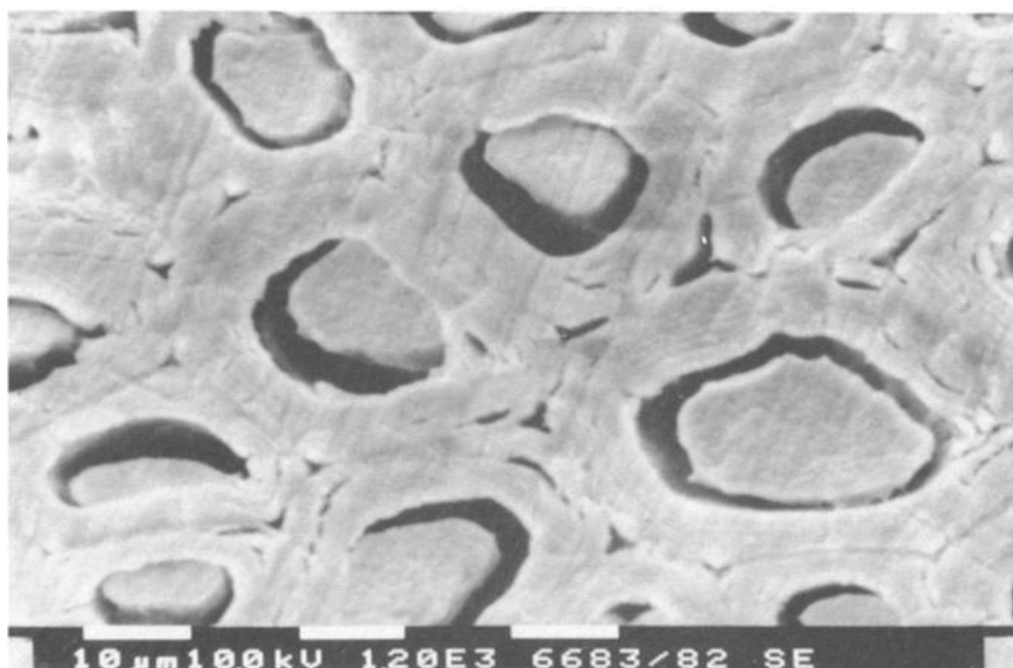


FIGURA 12 – Microestrutura da casca de noz macadâmia (WANG; MAI, 1994).

Com relação a sua composição química, segundo Toles, Marshall e Johns (1998) a casca da noz macadâmia possui 47,6% de lignina, 25,8% de celulose, 11,7% de hemiceluloses e 0,2% de cinzas e, conseqüentemente, 14,7% de compostos voláteis.

Pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de encontrar usos para a casca e o pericarpo. As cascas, por exemplo, podem ser utilizadas como cobertura orgânica morta (*mulch*), combustível para o processamento da macadâmia, meio de plantio para cultura de plantas e até plásticos manufaturados, enquanto o pericarpo pode ser utilizado também como *mulch* e para compostagem (SMALL, 2011).

Em um estudo realizado por Poinern et. al. (2011), no qual testou-se a substituição de carbono ativado de casca de coco, comumente utilizado, por carbono ativado de casca de noz macadâmia, para a extração de ouro do licor lixiviável proveniente da mineração deste metal, sendo que este licor possui cerca de 10mg de ouro por litro de licor. Conclui-se com este trabalho que o carbono ativado de casca de noz macadâmia apresentou recuperação do ouro comparável àquela apresentada pelo carbono ativado de casca de coco, podendo substituir ou ser utilizada em conjunto com este. Mas mudando os parâmetros de ativação poderia ser produzido um carbono ativado de casca de noz macadâmia muito eficiente, devido a sua grande resistência.

Dong e Davis (2012) produziram um compósito de poliéster com a adição de partículas de casca de noz macadâmia nas porcentagens de 10%, 20%, 30% e 40%, mostrando que o módulo de elasticidade aumentou com o aumento da quantidade de casca, entretanto a resistência à flexão diminuiu.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir estão descritos os materiais utilizados no presente trabalho, bem como as metodologias aplicadas nas etapas de produção, experimentação e análise de resultados dos painéis de partículas.

4.1. Materiais

As matérias-primas utilizadas nesse trabalho, para a produção dos painéis particulados de camada homogênea, foram partículas de *Eucalyptus saligna*, partículas de casca de noz macadâmia e adesivo ureia-formaldeído.

A madeira de *Eucalyptus saligna* utilizada foi proveniente de resíduos do processamento mecânico da madeira, as quais seriam utilizadas para a produção de paletes. Estes resíduos foram doados por serrarias localizadas na cidade de Itararé na região sudoeste do estado de São Paulo. As peças inicialmente foram seccionadas em menores dimensões adequadas para serem levadas ao picador, pois o mesmo tem capacidade para processar peças com até 7 cm de comprimento. Escolheu-se esta espécie de madeira devido a sua grande utilização industrial para a produção dos painéis de madeira. O lote de madeira utilizados para a produção dos painéis apresentou densidade média de 730 kg/m^3 , sendo a mesma adequada para a produção de painel.

As cascas de noz Macadâmia utilizadas foram obtidas de um produtor da cidade de Gália, interior de São Paulo. E não necessitaram passar por processamento inicial, pois já possuíam dimensões pequenas, suficiente para serem picadas. Como mencionado anteriormente a densidade média das partículas de casca de noz macadâmia é de 1300 kg/m^3 .

O adesivo utilizado para a produção dos painéis foi a resina ureia-formaldeído, tipo Cola Mite produzido pela Euroamerican, a base de água, alta resistência a calor e umidade, com teor de sólidos de aproximadamente 65%, pH próximo do neutro. Como catalisador utilizou-se o endurecedor Cola Mite produzido pela Euroamerican, composto por sulfato de amônia. Utilizou-se também a parafina Humocer 100 A70 IS, produzida pela Isogama.

4.2. Produção dos painéis

Toda a produção dos painéis e a caracterização físico-mecânica dos mesmos, baseada na norma ABNT NBR 14810-3/2006, foram realizadas na UNESP Campus Experimental de Itapeva.

Os painéis produzidos com dimensões nominais de 47 cm x 47 cm x 1 cm foram confeccionados em camada homogênea e com quatro diferentes composições, as quais variaram a porcentagem de casca de noz macadâmia. A Tabela 1 apresenta os tratamentos estudados, nos quais houve a variação das porcentagens com base em 2 kg de partículas com 3% de umidade por painel, peso este adequado para o volume do painel produzido mantendo a densidade nominal desejada de 0,90 g/cm³.

TABELA 1 – Composições utilizadas na produção dos painéis de partículas.

Tratamento	Porcentagem de casca de macadâmia	Massa de partículas [g]	
		Macadâmia	Eucalipto
1	0%	0	2000
2	30%	600	1400
3	60%	1200	800
4	100%	2000	0

A utilização da casca de macadâmia neste trabalho buscou apresentar uma aplicação viável economicamente e ambientalmente, minimizando o impacto ambiental causado por estes resíduos quando lançados de maneira aleatória no meio e ainda, agregar valor a um material que geralmente é descartado.

4.2.1. Geração e classificação das partículas

O processo utilizado para a geração e classificação das partículas foi o mesmo, tanto para a casca de macadâmia quanto para a madeira.

Inicialmente a matéria-prima foi levada ao picador de laboratório (redução primária) da marca Marconi modelo MA 683/3, localizado no Laboratório de Processamento da Madeira, onde suas dimensões foram reduzidas a um tamanho suficiente para serem processadas no moinho. Em seguida, as partículas foram levadas ao moinho de facas tipo Wiley (redução

secundária) da marca Marconi, localizado no Laboratório de Propriedades dos Materiais, onde foram reduzidas ao tamanho necessário para a produção dos painéis. Na Figura 13 estão apresentados os equipamentos de redução primária e redução secundária, utilizados para a produção das partículas.

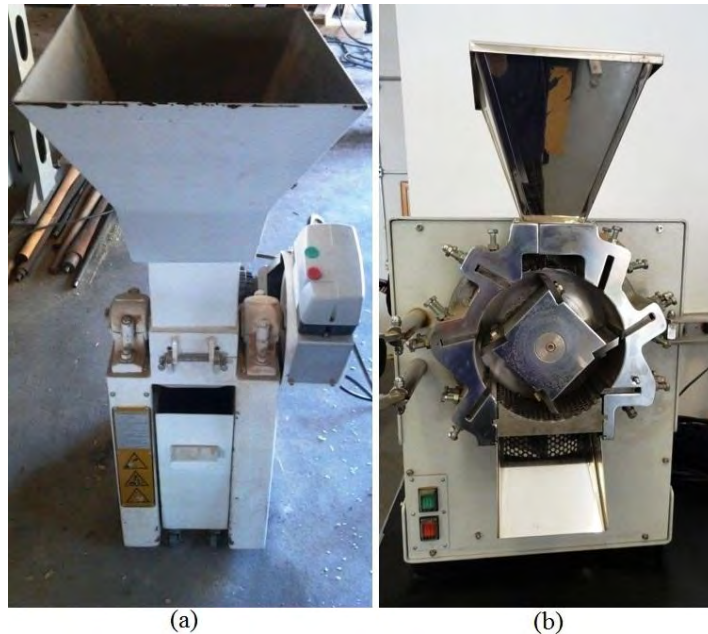


FIGURA 13 – Equipamentos utilizados para a geração das partículas; (a) Picador/Redução Primária; (b) Moinho/Redução secundária.

Entretanto, este processo não produz apenas partículas em dimensões adequadas para a produção dos painéis, portanto fez-se necessária a realização de uma classificação, com o intuito de se separar as partículas com o tamanho ideal, das partículas muito pequenas (*finos*) e das partículas muito grandes (*overs*). Para tanto utilizou-se um agitador de peneiras para análises granulométricas eletromagnético da marca Bertel, apresentado na Figura 14, localizado no Laboratório de Fluido-térmica e Ambiental.



FIGURA 14 – Agitador de peneiras utilizado para a classificação das partículas.

Foram utilizadas as peneiras de 10 mesh, onde ficaram alocadas os *overs* e a peneira de 20 mesh, onde ficaram alocadas as partículas do tamanho ideal de acordo com recomendações da literatura. O conjunto de peneiras dispõe de um recipiente na parte inferior onde foram coletados os finos. Os *overs* puderam ser reprocessados para a produção de novas partículas. Notou-se neste procedimento a grande produção de partículas finas, o que pode ser justificado pelo teor de umidade das partículas estar abaixo de 10%, o que proporciona excessiva geração de finos.

Na Figura 15 estão apresentadas as partículas de casca de macadâmia e de eucalipto no tamanho de 20 mesh, utilizadas para a produção dos painéis. Pode-se notar a diferença no tamanho e na geometria das partículas, sendo que as de eucalipto possuem maior comprimento se comparadas com as de casca de macadâmia que apresentam um formato mais cúbico.



FIGURA 15 – Partículas de eucalipto e de casca de macadâmia da peneira de 20 mesh.

Após a produção das partículas foi realizada a determinação da razão de esbeltez, que é a relação entre o comprimento e a espessura das partículas. Para tanto, foi realizada a medição do comprimento e da espessura, com o auxílio de um micrômetro, de 30 partículas tanto de eucalipto quanto de casca de noz macadâmia. Posteriormente foi determinada a razão de esbeltez através da equação (1).

$$RE = \frac{c}{e} \quad (1)$$

Onde: RE é a razão de esbeltez da partícula; c é o comprimento da partícula, em milímetros; e é a espessura da partícula, em milímetros.

Para a comparação dos resultados entre a razão de esbeltez do eucalipto e da casca de noz macadâmia utilizou-se o teste t não pareado, com nível de significância de 5%, através do software R versão 2.12.2 de 2011.

4.2.2. Aplicação do adesivo, formação do colchão e prensagem

Primeiramente, realizou-se o preparo do adesivo, as dosagens utilizadas tomaram como base o peso seco das partículas. Para tal utilizou-se 10% de adesivo ureia-formaldeído, 1% emulsão de parafina, 2% de sulfato de amônia como catalisador e 2,5% água (Figura 16a). As porcentagens foram definidas a partir do teor de umidade das partículas que se encontraram em torno de 3%. Os quatro elementos foram misturados em um béquer com o auxílio de uma haste metálica até que estivessem totalmente homogeneizados (Figura 16b).

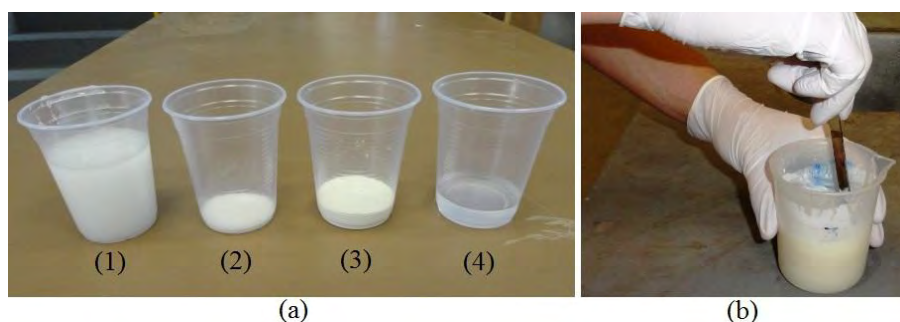


FIGURA 16 – Preparação do adesivo; (a) 1 – adesivo, 2 – catalisador, 3 – emulsão de parafina e 4 – água; (b) Mistura dos componentes da solução adesiva.

Em seguida, a solução adesiva foi adicionada às partículas e misturada no equipamento da marca Braesi, modelo BP-12 apresentado na Figura 17. A mistura ocorreu até que a homogeneização estivesse completa.



FIGURA 17 – Equipamento utilizado para a mistura.

A aplicação do adesivo para cada painel ocorreu em duas etapas, pois o equipamento utilizado para misturar a solução adesiva com as partículas não comportava 2 kg de uma só vez, portanto misturou-se metade das partículas, ou seja, 1 kg, com metade da solução adesiva, e depois a outra metade das partículas com a outra metade da solução adesiva. Em seguida, as duas partes foram unidas e homogeneizadas.

Após a aplicação do adesivo houve a formação do colchão de partículas, o qual ocorreu em uma forma vazada de madeira apresentada na Figura 18. Na parte inferior foi posicionada uma placa de aço protegida com uma folha de alumínio para que as partículas não impregnassem na placa durante a prensagem. As partículas foram dispostas no interior da forma de madeira, e espalhadas o mais uniformemente possível manualmente.



FIGURA 18 – Forma vazada para a formação do painel.

Na sequência foi realizada uma pré-prensagem com o auxílio de uma chapa de madeira com as dimensões do vão da forma, com a aplicação de uma força de 40 kg. A intenção desta pré-prensagem foi a redução dos espaços vazios entre as partículas, consequentemente a diminuição do ar no interior do colchão, e também a consolidação do colchão para facilitar o seu transporte até a prensa. Na Figura 19 pode-se ver o colchão de partículas após a realização da pré-prensagem e a retirada da forma de madeira.



FIGURA 19 – Colchão de partículas do painel de 100% de macadâmia após a pré-prensagem.

Posteriormente, outra placa revestida com papel alumínio foi colocada sobre o colchão de partículas e então o mesmo foi levado para a prensa (Figura 20) hidráulica com sistema de aquecimento da marca Hidral-Mac, modelo PHH 80T. A prensagem foi realizada a uma temperatura de 150°C e pressão de 30 kgf/cm², durante 10 minutos.



FIGURA 20 – Prensa utilizada na prensagem dos painéis.

Após 10 minutos o painel foi retirado da prensa e acondicionado de acordo com as especificações normativas durante duas semanas até a produção dos corpos de prova.

O procedimento descrito acima foi realizado da mesma maneira para todos os painéis produzidos para os quatro tratamentos.

4.3. Determinação do teor de extrativos e pH

Inicialmente realizou-se a produção das amostras, tanto de eucalipto quanto de casca de noz macadâmia, baseado no padrão TAPPI T257 cm-85. Para isso utilizou-se o mesmo processo de geração e classificação de partículas descrito no item 4.2.1. Recolhendo-se, na classificação das partículas, as que passaram pela peneira de 32 mesh e foram retidas na peneira de 60 mesh.

Logo após a geração das partículas obteve-se o valor do absolutamente seco (a.s.). Para isso, pesou-se aproximadamente 2 g de partículas (amostra úmida) em um cadinho de alumínio, previamente pesado, com o auxílio de uma balança analítica Shimadzu, modelo AW 220, com precisão de 0,0001g. Posteriormente, o cadinho foi levado à estufa à 103 ± 2 °C, onde permaneceu por 24 horas. Depois de transcorrido este tempo, foi retirado da estufa e levado ao dessecador até esfriar, sendo então novamente pesado. Desta forma, obteve-se o peso da amostra seca.

Com a massa da amostra seca e da amostra úmida, pôde-se determinar o valor absolutamente seco das partículas através da Equação (2).

$$a. s. = \frac{m_u - m_s}{m_u} \quad (2)$$

Onde: *a. s.* é valor absolutamente seco das partículas, em porcentagem; m_u é a massa úmida da amostra, em gramas; m_s é a massa seca da amostra, em gramas.

Este procedimento foi realizado três vezes tanto para o eucalipto quanto para a macadâmia. E dos valores obtidos foram retiradas a média aritmética e o desvio padrão.

4.3.1. Extrativos totais

Para a determinação dos extrativos totais, foram produzidas quatro amostras de ambas as matérias-primas. Para isso pesou-se aproximadamente 3 gramas a.s., ou seja, 3 gramas de partículas livre de umidade com base na porcentagem de a.s., em um sachê de papel filtro (Figura 21), para cada amostra. O teste foi realizado baseado no padrão TAPPI T204 cm-97.

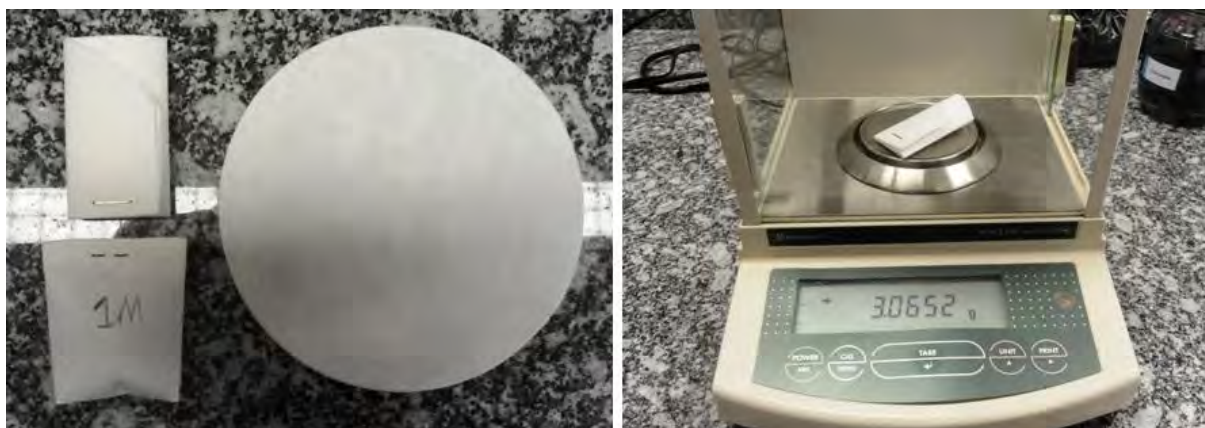


FIGURA 21 – Sachê de papel filtro utilizado para a realização da determinação do teor de extrativos totais.

O processo de determinação dos extrativos totais consistiu basicamente de três etapas, a primeira foi a extração com etanol-tolueno, a segunda a extração com etanol e a terceira a extração com água quente no banho Maria.

Na primeira etapa os sachês foram alojados no sifão do tubo de extração (Figura 22a), de forma que não atingisse a extremidade superior do mesmo. Então se iniciou o processo de extração, por 5 horas, com a utilização de 750 mL de uma solução de etanol-tolueno na concentração 1:1, a qual foi introduzida no balão de fundo chato localizado na extremidade inferior do tubo de extração. Este processo consiste na ebulição da solução, que sobe até o trocador de calor localizado sobre o sifão, onde é condensado, e cai sobre os sachês. Após atingir certo limite do sifão o líquido desce para o balão de fundo chato, onde é novamente transformado em vapor. Este processo ocorreu diversas vezes durante as 5 horas de extração. Desta forma os extrativos foram retirados das amostras e se alojaram no balão. O mesmo processo foi realizado na segunda etapa com uma solução de 750 mL de etanol, por mais 4 horas.

Posteriormente, foi realizada a última etapa da extração. Para isso, cada sachê foi aberto e o seu conteúdo retirado com o auxílio de uma pisseta e depositado em um béquer com 150

mL de água destilada. Então, os béqueres foram levados ao banho Maria, à temperatura de 98°C, por uma hora, como apresentado na Figura 22b.

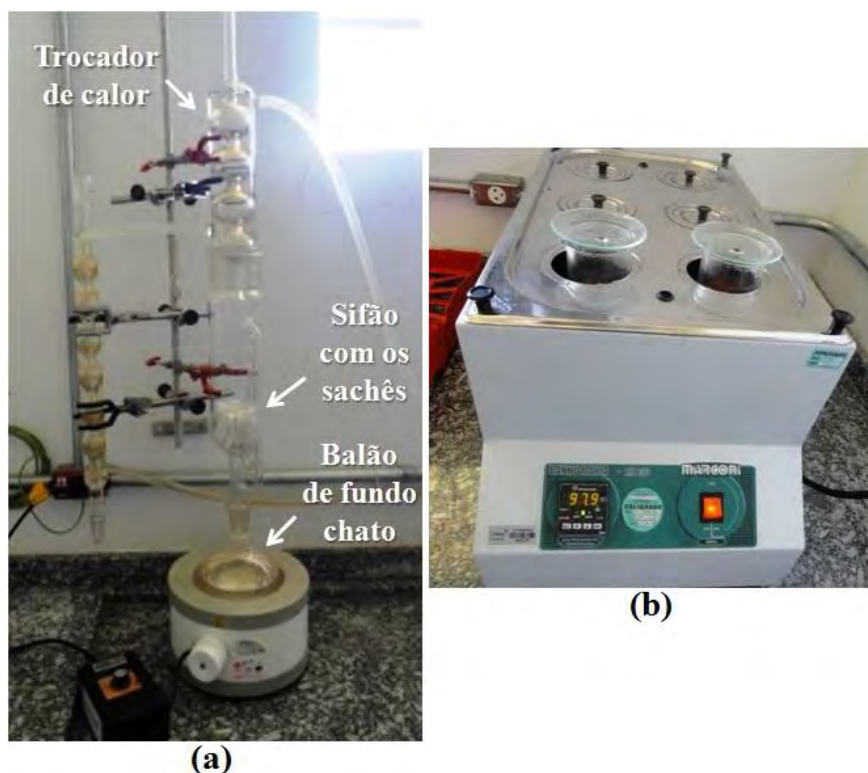


FIGURA 22 – Processo de extração; (a) Extração com etanol-tolueno e etanol; (b) Extração com banho Maria.

Após o processo de extração, o conteúdo de cada béquer foi levado à filtração, no qual se utilizou um sistema de filtração por bomba a vácuo (Figura 23). Neste sistema, o conteúdo do béquer foi sendo despejado em um cadinho filtrante, com a massa previamente determinada, ligado ao kitassato, que por sua vez estava ligado à bomba de vácuo, foram utilizados 500 mL de água quente para lavar a amostra durante a filtração. Este processo foi realizado com cada béquer, obtendo-se no total, quatro cadinhos filtrantes para a casca de noz macadâmia e quatro para o eucalipto, os quais foram levados à estufa por 24 horas, e após isso, foram novamente pesados. Das massas obtidas foram subtraídas as massas dos cadinhos, encontrando-se, portanto, a massa das partículas livre de extrativos.



FIGURA 23 – Sistema de filtração a vácuo.

Finalmente, com a massa inicial das partículas e com a massa livre de extrativos, pôde-se obter o teor de extrativos totais das amostras, através da Equação (3). E com o cálculo da média aritmética e do desvio padrão, obteve-se o teor de extrativos totais do eucalipto e da casca de noz macadâmia.

$$TET = \frac{m_{inicial} - m_{LE}}{m_{inicial}} \quad (3)$$

Onde: TET é o teor de extrativos totais, em porcentagem; $m_{inicial}$ é a massa inicial a.s. da amostra, em gramas; m_{LE} é a massa livre de extrativos, em gramas.

4.3.2. Solubilidade em água quente e pH

O teste de solubilidade foi realizado com o intuito de se determinar quanto do teor de extrativos totais é solúvel em água quente, de acordo com o padrão TAPPI T207 cm-99, e a partir disso determinar o pH, de acordo com o padrão TAPPI T252 om-98.

Para isso, inicialmente, foram pesadas duas amostras de 2g a.s. de partículas de casca de noz macadâmia e de eucalipto em béqueres separados. Completou-se o conteúdo de cada béquer com 100 mL de água destilada. E, então, os mesmos foram levados ao banho Maria (Figura 22b) por um período de três horas, na temperatura de 99°C. Depois de transcorrido

este tempo, o conteúdo de cada bquer foi filtrado, da mesma forma como apresentado na Figura 23, em cadinho filtrante com massa previamente determinada. O líquido resultante da filtração foi separado para posterior determinação do pH e, então, as partículas retidas nos cadinhos foram lavadas com 200 mL de água fervente.

Após isso, os cadinhos foram levados à estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas e então novamente pesados para a determinação da massa seca. Com os valores obtidos calculou-se o teor de extrativos solúveis em água, através da Equação (4).

$$TES = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{LES}}}{m_{\text{inicial}}} \quad (4)$$

Onde: *TES* é o teor de extrativos solúveis em água quente, em porcentagem; m_{inicial} é a massa inicial a.s. da amostra, em gramas; m_{LES} é a massa livre de extrativos solúveis em água quente, em gramas.

Os líquidos resultantes da filtragem foram separados em quatro béqueres, sendo dois de eucalipto e dois de casca de noz macadâmia, e completados para 100 mL, com água destilada. E com a utilização de um pHmetro da marca Hanna pH 21 (Figura 24), foram determinados o pH de cada amostra.



FIGURA 24 – pHmetro utilizado na determinação do pH

4.4. Ensaios físicos

Para os ensaios físicos foram utilizados os seguintes equipamentos: balança digital semi-analítica da marca Digimed, modelo KN4000, estufa para secagem e esterilização da marca Marconi, modelo MA 033, paquímetro digital da marca Digimess, com precisão de 0,01mm e micrômetro digital da marca Digimess, modelo IP54, com precisão de 0,001mm.

Os ensaios físicos realizados foram o teor de umidade, densidade, inchamento e absorção de água e basearam-se na norma ABNT NBR 14810-3/2006. Todos os corpos de prova, após terem sido produzidos, foram acondicionados em ambiente climatizado à 25°C, por pelo menos 72 horas.

4.4.1. Teor de umidade

Na realização dos testes para a determinação do teor de umidade das chapas de partículas de madeira, utilizaram-se 10 corpos de prova por chapa, com sessão transversal de 50mm x 50mm (Figura 25), para cada tratamento, número de amostras atendendo as especificações normativas.



FIGURA 25 – Corpos de prova de teor de umidade e densidade, provenientes do tratamento 1, 2, 3 e 4, da esquerda para a direita, respectivamente.

Inicialmente os corpos de prova foram pesados individualmente para determinação da massa úmida, e em seguida, foram colocados em estufa a 103 ± 2 °C até obter massa constante. Considerou-se a massa constante quando não variou mais do que 0,1%, passadas

4h em estufa.

Logo após a retirada da estufa, as amostras foram esfriadas em dessecador e novamente pesados para obtenção da massa seca.

Para o cálculo da porcentagem do teor de umidade, utilizou-se a Equação (5).

$$TU = \frac{M_U - M_S}{M_S} \times 100 \quad (5)$$

Onde: TU é a umidade residual do corpo de prova, em porcentagem; M_U é a massa úmida do corpo de prova, em gramas; M_S é a massa seca do corpo de prova, em gramas.

4.4.2. Densidade

Na realização dos testes para a determinação do teor de umidade das chapas de partículas de madeira, utilizaram-se 10 corpos de prova por tratamento, com seção transversal de 50mm x 50 mm, a mesma apresentada pelo corpo de prova de teor de umidade apresentado anteriormente na Figura 25.

Após os corpos de prova terem sido devidamente identificados, mediu-se a espessura com a utilização de um micrômetro digital com precisão de 0,001 mm. A espessura foi medida em cinco pontos, sendo um no centro e os demais nas extremidades como apresentado na Figura 26, e então calculada a média aritmética, conforme a ABNT NBR 14.810-3/2006. Foram medidos também o comprimento e a largura, utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. E por fim, os corpos de prova foram pesados em balança semi-analítica com precisão de 0,1g.



FIGURA 26 – Medição da espessura do corpo de prova em cinco pontos.

O cálculo da densidade foi feito através da Equação (6).

$$D = \frac{m}{L \times C \times E} \times 10^6 \quad (6)$$

Onde: D é a densidade do corpo de prova, em kg/m^3 ; m é a massa do corpo de prova, em gramas; L é a largura do corpo de prova, em milímetros; C é o comprimento do corpo de prova, em milímetros; E é a espessura do corpo de prova, em milímetros.

4.4.3. Inchamento e absorção

Na realização dos testes de inchamento e de absorção de água das chapas de partículas de madeira, utilizaram-se 10 corpos de prova para cada teste, com sessão transversal de 25mm x 25 mm (Figura 27a), para cada tratamento, sempre atendendo as especificações da NBR 14.810-3/2006.

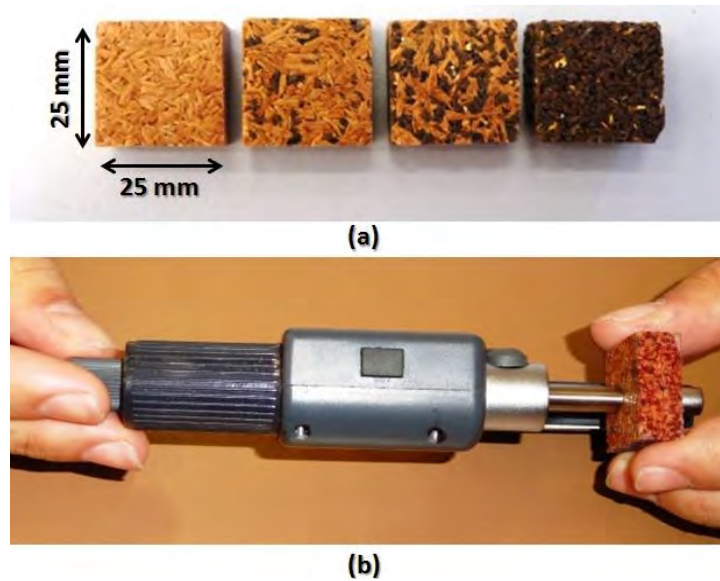


FIGURA 27 – (a) Corpos de prova para o ensaio de inchamento e absorção de água, provenientes do tratamento 1, 2, 3 e 4, da esquerda para a direita, respectivamente; (b) Medição da espessura de um corpo de prova para o ensaio de inchamento.

Após a confecção e identificação das amostras, mediu-se a espessura inicial no centro de cada uma (Figura 27b), utilizando-se um micrômetro com precisão de 0,001 mm, para o teste de inchamento e obtidas as massas iniciais em uma balança semi-analítica, com precisão de 0,1g, para o teste de absorção de água.

Posteriormente, os corpos de prova foram submersos em água destilada em um recipiente, de forma que ficassem totalmente submersos. Isso ocorreu em uma sala climatizada, com a intenção de que a temperatura da água permanecesse em $20 \pm 2^\circ\text{C}$, como exigido pela norma.

Após 2 horas $\pm$ 3 min e 24 horas $\pm$ 3 min de imersão retirou-se os corpos de prova do recipiente e, o excesso de água, foi removido com papel absorvente. Mediu-se novamente a espessura dos corpos de prova de inchamento e obteve-se a massa em balança semi-analítica para as amostras de absorção de água, para ambos os tempos de imersão.

O cálculo de inchamento em espessura do corpo de prova foi realizado através da Equação (7).

$$I = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100 \quad (7)$$

Onde: I é o inchamento em espessura do corpo de prova, em porcentagem; E_1 é a espessura do corpo de prova após o período de imersão considerado, em milímetros; E_0 é a

espessura do corpo de prova antes da imersão, em milímetros.

Para o cálculo da absorção de água utilizou-se a Equação (8).

$$A = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (8)$$

Onde: A é a absorção de água, em porcentagem; M_1 é a massa do corpo de prova após o período de imersão, em gramas; M_0 é a massa do corpo de prova antes da imersão, em gramas.

4.5. Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados foram o de flexão estática, para a determinação do módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), e o de tração perpendicular às fibras ou adesão interna. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade de carga de 30 toneladas - Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP – Campus de Itapeva (Figura 28). Os ensaios foram executados conforme especificações normativas da ABNT NBR 14810-3/2006. Todos os corpos de prova, após terem sido produzidos, foram acondicionados em ambiente climatizado à 25°C, por pelo menos 72 horas.



FIGURA 28 – Máquina universal de ensaios utilizada para realização dos testes mecânicos.

4.5.1. Resistência à flexão estática

Foram utilizados 10 corpos de prova por tratamento de 250 mm x 50 mm no ensaio de flexão estática para a determinação do MOR e MOE. Na Figura 29 estão apresentados os corpos de prova utilizados.



FIGURA 29 – Corpos de prova de flexão estática, provenientes do tratamento 1, 2, 3 e 4, de baixo para cima, respectivamente.

Primeiramente, como o auxílio de um paquímetro digital, foram medidas a espessura e a largura no centro dos corpos de prova, local este onde aplicou-se a carga. Posteriormente os corpos de prova foram dispostos na máquina de ensaios para a realização dos testes, de forma que o cutelo de carregamento coincidisse com o centro do corpo de prova e os apoios laterais ficassem a 25 mm da sua extremidade, formando, portanto, um vão de 200 mm. Na Figura 30 pode-se ver o encaixe do corpo de prova na máquina para a realização do ensaio.



FIGURA 30 – Ensaio de flexão sendo realizado na máquina universal de ensaios.

No decorrer do ensaio a carga foi sendo aplicada, com velocidade constante de 6mm/min, até que houvesse o rompimento do corpo de prova e assim os valores de carga de ruptura e deformação pudessem ser coletados pelo software da máquina de ensaio. As equações para o cálculo do MOR e do MOE, apresentadas a seguir, foram adicionadas ao software, para que fossem diretamente calculadas, e para isso foram inseridas as medidas de espessura e largura de cada amostra.

O módulo de ruptura foi calculado através da Equação (9).

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

Onde: MOR é o módulo de ruptura, em MPa; P é a carga de ruptura, em N; D é a distância entre apoios do aparelho, em milímetros; B é a largura do corpo de prova, em milímetros; E é a espessura do corpo de prova, em milímetros.

O módulo de elasticidade foi calculado através da Equação (10).

$$MOE = \frac{P_1 \times D^3}{d \cdot 4 \cdot B \cdot E^3} \quad (10)$$

Onde: MOE é o módulo de elasticidade, em MPa; P_1 é a carga no limite proporcional, em N; d é a deflexão em correspondente à carga P_1 , em milímetros.

4.5.2. Resistência à tração perpendicular ou adesão interna

Para a realização do ensaio foram confeccionados 10 corpos de prova por tratamento, com sessão transversal de 50 mm x 50 mm, a mesma do corpo de prova de teor de umidade apresentado anteriormente na Figura 21.

Após a confecção das amostras, foi realizada a medição da sua largura e comprimento, com um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Os corpos de prova foram, então, lixados e colados entre duas sapatas, com dimensões de 75 mm x 60 mm (Figura 31a), com a utilização de um adesivo epoxi instantâneo de uso geral da marca Leo, e pressionados com um sargento por 24 horas (Figura 31b). Após a colagem, os conjuntos foram acondicionados em ambiente climatizado com temperatura de 25°C, por pelo menos 72 horas.

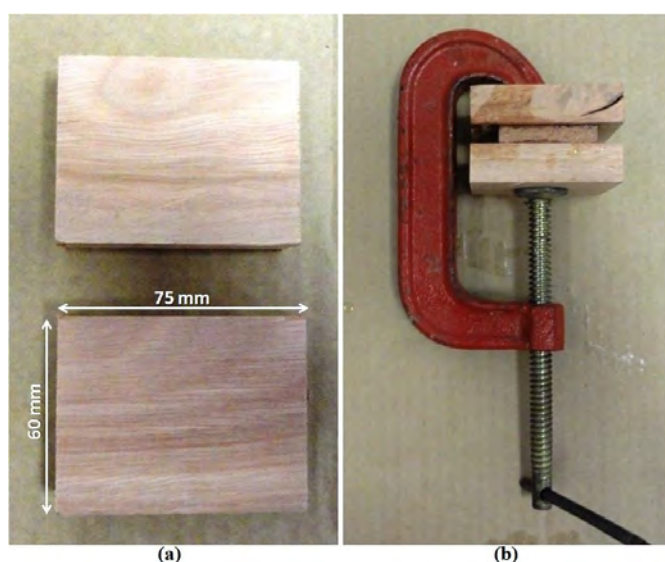


FIGURA 31 – Preparação do corpo de prova para o ensaio de adesão interna. (a) Sapatas; (b) Colagem dos corpos de prova com um sargento.

Após a climatização, acoplou-se o conjunto no dispositivo de tração na Máquina Universal de Ensaio, como apresentado na Figura 32, e regulou-se a velocidade de carregamento para 4 mm/min, segundo especificação da norma. Em seguida, foi acionada a máquina de ensaios até a ruptura do corpo de prova. A Equação (8), apresentada a seguir, que refere-se ao cálculo da resistência a tração perpendicular. A mesma foi adicionada ao software da máquina de ensaios, juntamente com as dimensões dos corpos de prova, para que a resistência à tração perpendicular fosse calculada automaticamente após a ruptura.



FIGURA 32 – Ensaio de tração perpendicular na máquina universal de ensaios.

A resistência à tração perpendicular foi calculada através da Equação (11).

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

Onde: TP é a resistência à tração perpendicular, em MPa; P é a carga na ruptura, em N; S é a área da superfície do corpo de prova, em mm².

4.6. Análise dos resultados

Os resultados dos ensaios físicos e mecânicos foram avaliados pela análise de regressão linear simples, à um nível de significância de 5% para a análise de variância da regressão. Para tal foram verificadas inicialmente as condicionantes de regressão que são a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias, através dos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Todas as análises foram realizadas no software R versão 2.12.2 de 2011.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios para a caracterização física e mecânica dos painéis de partículas, juntamente com as comparações realizadas entre os resultados deste trabalho e os encontrados na literatura e nas especificações normativas.

5.1. Razão de esbeltez

A razão de esbeltez média encontrada para as partículas de *Eucalyptus saligna* foi de $15,44 \pm 4,02$, enquanto que para as partículas de casca de noz macadâmia foi de $2,60 \pm 0,99$, valores estes que se apresentaram estatisticamente diferentes entre si a um nível de significância de 5% ($t_{32,52} = 16,97$, $p < 0,05$). Na Figura 33 apresenta-se a distribuição dos dados da razão de esbeltez de ambos os tipos de partículas, onde o ponto “x” representa o valor médio.

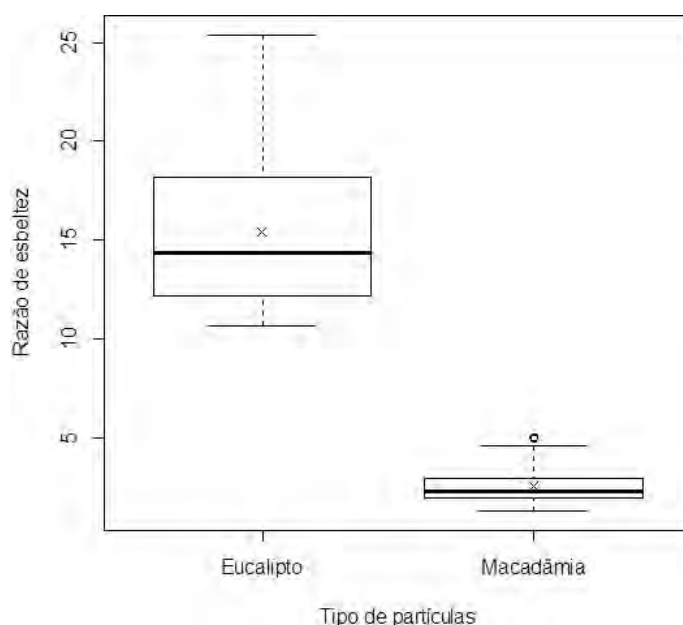


FIGURA 33 – Gráfico da distribuição dos dados de razão de esbeltez.

Pela Figura 33 pode-se notar que apesar de as partículas de macadâmia apresentarem valores menores de razão de esbeltez, os mesmos apresentaram-se mais homogêneos, ou seja, com uma menor variação. Enquanto que os valores de razão de esbeltez encontrados para o

eucalipto obtiveram maior variação, mas pode-se notar também que 75% destes valores mostraram-se estar entre 12 e 18, aproximadamente. Portanto, apresentando poucas partículas com uma razão de esbeltez que alcançavam ou passavam de 20.

O que promoveu essa diferença expressiva na razão de esbeltez entre as duas matérias-primas foi que as partículas de macadâmia além de possuírem comprimento menor, possuíam também espessura maior, como pode também ser observado na Figura 15, apresentada no item 4.2.1.

Essa baixa razão de esbeltez influenciou diretamente nos valores obtidos das propriedades de MOR, inchamento em espessura e absorção de água, resultados que serão discutidos posteriormente. Moslemi (1974) já havia estudado a relação entre a razão de esbeltez e as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, como pode-se verificar na Figura 34, na qual observa-se que a menor razão de esbeltez resulta em menor MOR, maior inchamento em espessura e maior absorção de água, tornando o material menos resistente e mais instável.

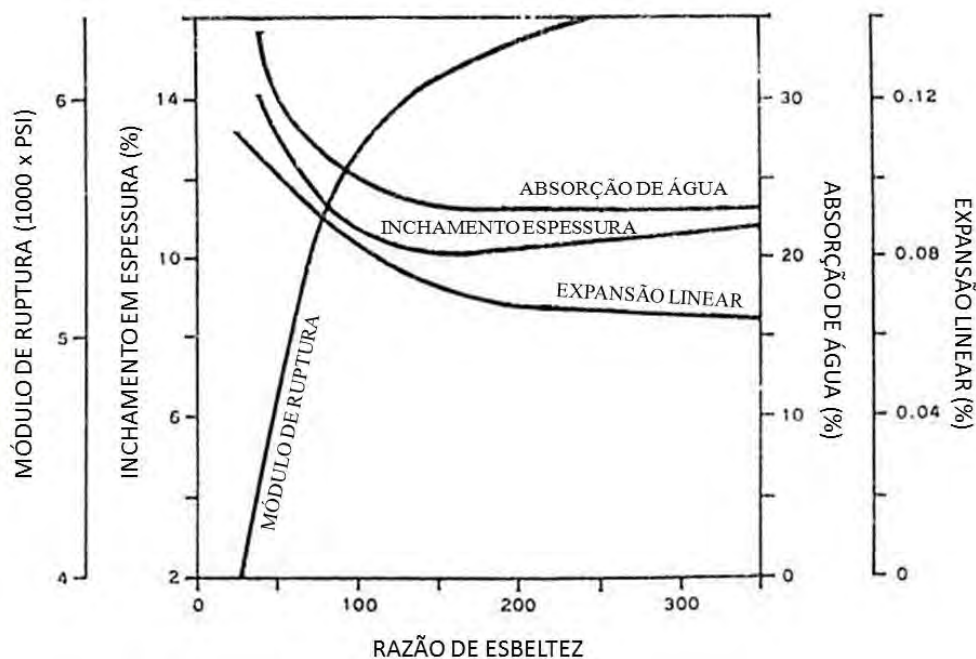


FIGURA 34 – Módulo de ruptura, inchamento em espessura, absorção de água e expansão linear em função da razão de esbeltez (Adaptado de MOSLEMI, 1974).

5.2. Teor de extrativos e pH

Os resultados médios de teor de extrativos totais, teor de extrativos solúveis em água quente e pH estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – Teores de extrativos e pH médios do Eucalipto e da casca de noz macadâmia.

Amostra	T. E. Totais (%)	T. E. Solúveis em Água Quente (%)	pH
Macadâmia	6,15 (0,18)*	3,36 (0,15)	5,98 (0,10)
Eucalipto	11,20 (0,15)	9,73 (0,13)	3,74 (0,01)

* Os valores apresentados entre parênteses representam os desvios padrões.

Como se pode notar o teor de extrativos da casca de noz de macadâmia é quase metade do teor de extrativos da madeira de eucalipto, o que pode indicar que não haverá influência do teor de extrativos da casca de noz macadâmia nas propriedades físico-mecânicas dos painéis produzidos com a adição deste material.

O mesmo pode ser percebido com relação ao pH, pois este se apresentou mais próximo do neutro para as partículas da casca de noz macadâmia, do que para as partículas de madeira de eucalipto.

5.3. Ensaios físicos

A seguir estão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização física de densidade, teor de umidade, inchamento após 2 horas e 24 horas e, por fim absorção de água 2 horas e 24 horas. A Tabela 3 apresenta os valores médios e os desvios padrões dos ensaios físicos realizados para os quatro tratamentos.

TABELA 3 – Valores médios dos ensaios físicos realizados para cada tratamento.

Ensaio	Tratamentos			
	1	2	3	4
Densidade (kg/m³)	923,67 (56,08)*	879,74 (33,86)	877,41 (35,25)	838,55 (21,04)
Teor de Umidade (%)	9,43 (0,23)	9,46 (0,24)	9,5 (1,33)	9,58 (0,31)
Inchamento 2h (%)	1,25 (0,51)	1,85 (0,47)	2,17 (0,56)	1,78 (0,40)
Inchamento 24h (%)	4,67 (1,59)	7,23 (1,36)	8,49 (0,54)	10,88 (0,74)
Absorção 2h (%)	3,22 (1,29)	4,46 (1,07)	4,91 (0,75)	4,4 (1,27)
Absorção 24h (%)	10,39 (3,42)	15,42 (2,68)	16,2 (1,38)	14,1 (1,12)

* Os valores apresentados entre parênteses representam os desvios padrões de cada tratamento.

5.3.1. Densidade

Na Figura 35 está apresentado o gráfico com a reta ajustada da regressão linear realizada.

O modelo apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,37$, o qual é relativamente baixo, mostrando que o modelo não apresenta uma boa representação dos dados, devido à grande variação da densidade obtidas na caracterização das amostras. Entretanto, através da análise de variância da regressão ($F_{1,38} = 22,13$; $p < 0,05$), verificou-se que a densidade varia em função da casca. Portanto, pode ser visto através da Figura 35, que conforme se adicionam partículas de casca de noz macadâmia ocorre a diminuição da densidade do painel. Isso se deve a quantidade maior de espaços que as partículas de macadâmia causam no painel, devido a sua alta densidade e reduzida razão de esbeltez, dificultando a compactação.

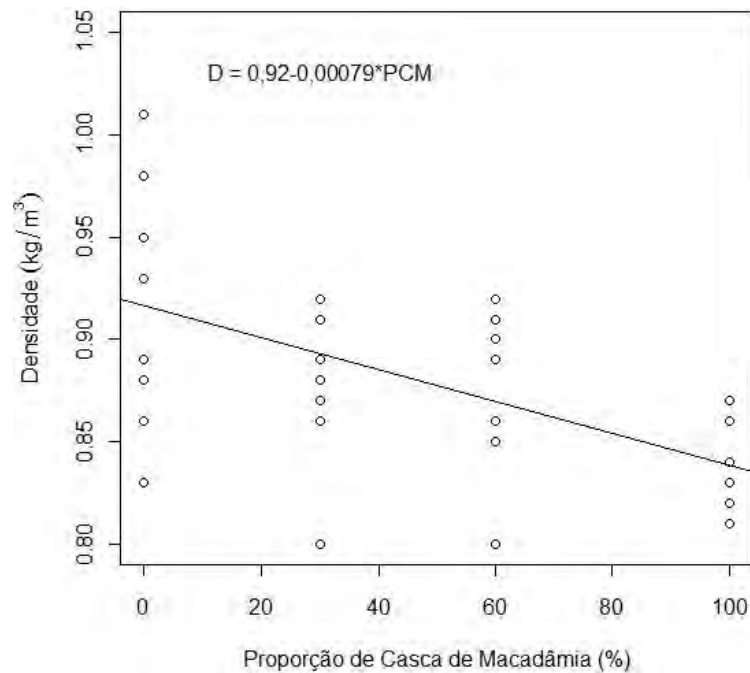


FIGURA 35 – Regressão linear da densidade em função da proporção de casca.

Os painéis produzidos podem ser classificados como sendo de alta densidade de acordo com a ABNT NBR 14810-2/2006, pois a mesma classifica painéis de média densidade como sendo de 551 kg/m^3 a 750 kg/m^3 , e como os painéis aqui produzidos apresentaram densidades superiores a 800 kg/m^3 , eles podem ser classificados como sendo de alta densidade.

Em um estudo realizado por Cai et. al. (2004) foi exposto que a densidade é o fator que mais influenciou as propriedades mecânicas dos painéis de partículas produzidos no estudo. O seu aumento ocasionou o aumento tanto do MOR e do MOE quanto da adesão interna. Desta forma, os painéis com menor densidade apresentariam menores valores nestas propriedades. Portanto, neste estudo a densidade dos painéis acabou influenciando nos resultados obtidos. E esta diminuição da densidade foi devido à difícil compactação das partículas de macadâmia, por causa de sua alta densidade.

5.3.2. Teor de Umidade

O gráfico da Figura 36 apresenta a reta ajustada da regressão linear referente aos resultados dos testes para a determinação do teor de umidade do painel em função da proporção de casca.

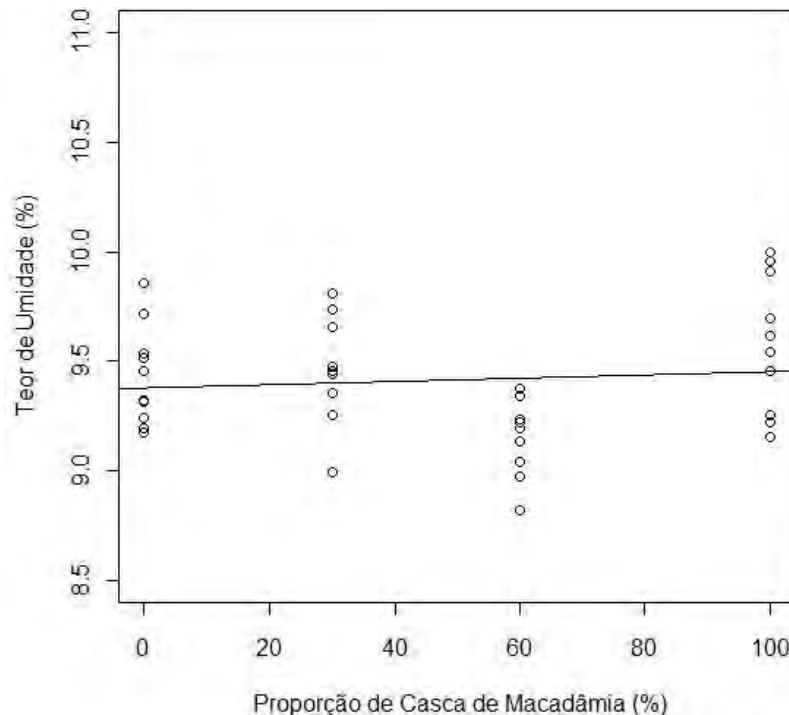


FIGURA 36 – Regressão linear do teor de umidade em função da proporção de casca.

O modelo da Figura 36 apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,01$, portanto, pode-se notar que o modelo não pode ser utilizado para representar os dados. E a análise de variância da regressão ($F_{1,37} = 0,37$; $p > 0,05$) a um nível de significância de 5%, mostrou que não houve relação entre a proporção de casca e o teor de umidade, evidenciando que os teores de umidade obtidos são estatisticamente iguais. Sendo um resultado satisfatório para a realização dos ensaios mecânicos, pois o teor de umidade reflete na resistência mecânica dos painéis, e isto poderia afetar a posterior comparação dos resultados obtidos nestes ensaios.

O teor de umidade do painel é afetado principalmente pelo teor de umidade inicial das partículas, e como ele estava por volta de 3% tanto para as partículas de Eucalipto quanto para as partículas de macadâmia, isso ocasionou baixo teor de umidade final dos painéis e homogeneidade de teores de umidade entre os quatro tratamentos.

5.3.3. Inchamento em Espessura

Os gráficos da Figura 37 e Figura 38 apresentam a reta ajustada da regressão linear para o inchamento em espessura de 2 horas e o de 24 horas, respectivamente.

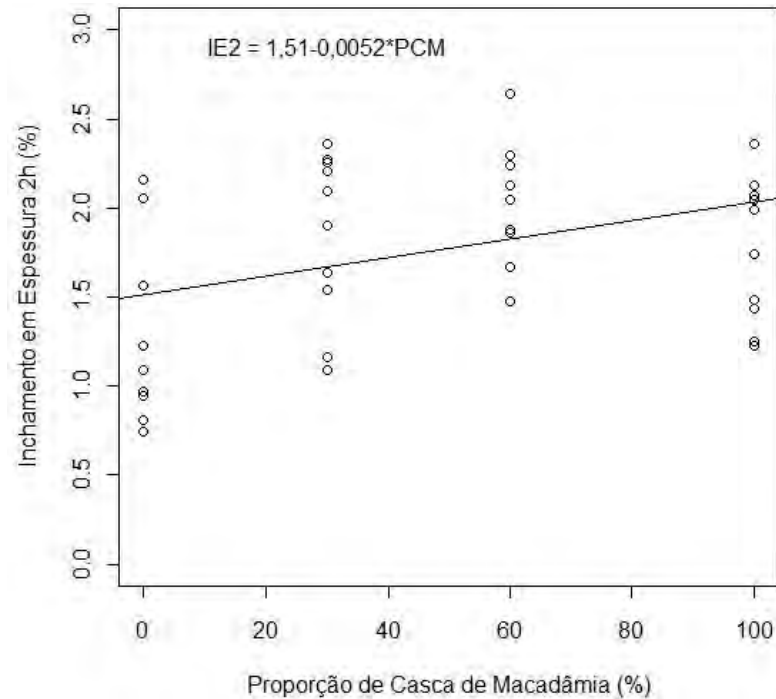


FIGURA 37 – Gráfico de regressão linear para o inchamento em espessura de 2 horas

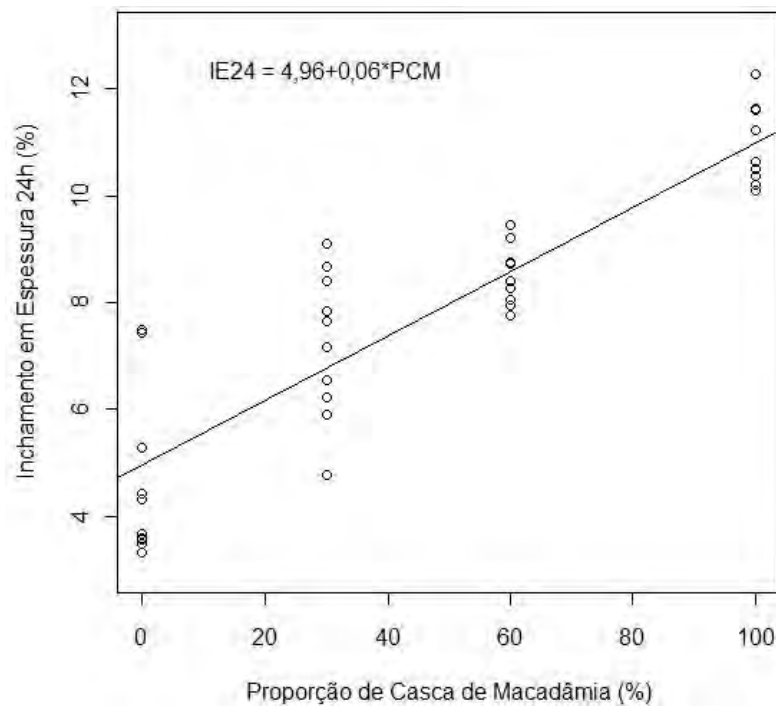


FIGURA 38 – Gráfico de regressão linear para o inchamento em espessura de 24 horas.

Como pode ser observado em ambos os gráficos da Figura 37 e da Figura 38, houve uma tendência de aumento do inchamento em relação ao aumento da proporção de casca, o que foi confirmado pela análise de variância da regressão tanto para o inchamento em espessura de 2h ($F_{1,38} = 4,877$; $p < 0,05$), quanto para o de 24h ($F_{1,38} = 149,4$; $p < 0,05$), mostrando que houve dependência entre as variáveis a um nível de significância de 5%. É

interessante ressaltar que apesar de o coeficiente de determinação da Figura 37, $R^2 = 0,11$, não ter sido significativo, o coeficiente de determinação da Figura 38, $R^2 = 0,80$, mostrou-se significativo, evidenciado que o modelo ajustado foi adequado para 80% dos dados obtidos.

Com isso percebe-se que conforme se adiciona casca de noz macadâmia ocorre um aumento no inchamento em espessura do painel, isso pode ser justificado principalmente devido a geometria das partículas. Haselein et. al. (2002) mostraram em seu estudo que o aumento da espessura das partículas de painéis aglomerados foi diretamente proporcional ao aumento do inchamento em espessura de 24h das chapas. Portanto, como a espessura das partículas de macadâmia mostraram-se maiores, o aumento da sua proporção no painel acarretou o aumento no inchamento em espessura, como já havia sido comprovado por Moslemi (1974).

5.3.4. Absorção de Água

Nas Figuras 39 e 40 estão apresentados os gráficos com a reta ajustada da regressão linear para a absorção de água durante 2 horas e durante 24 horas, respectivamente.

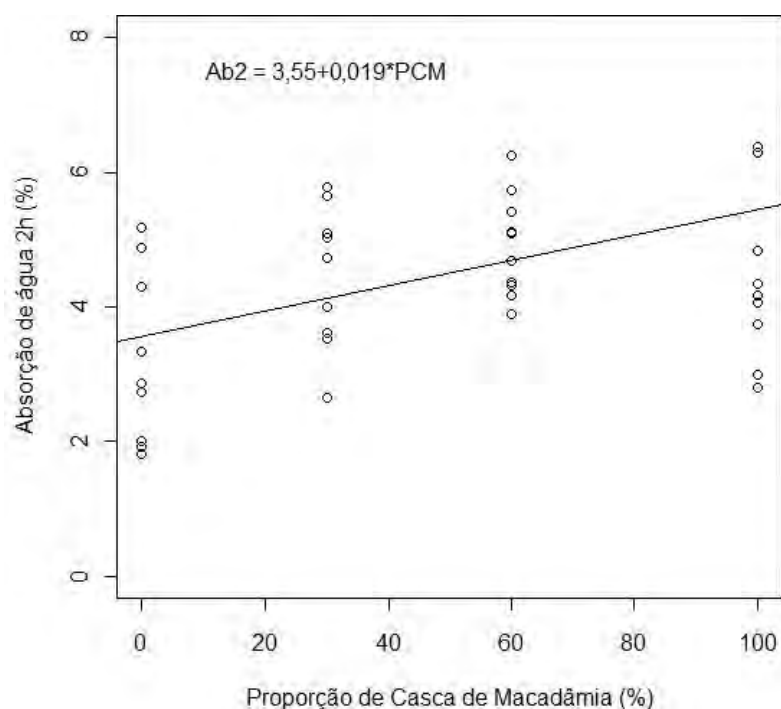


FIGURA 39 – Gráfico de regressão linear para a absorção de água de 2 horas.

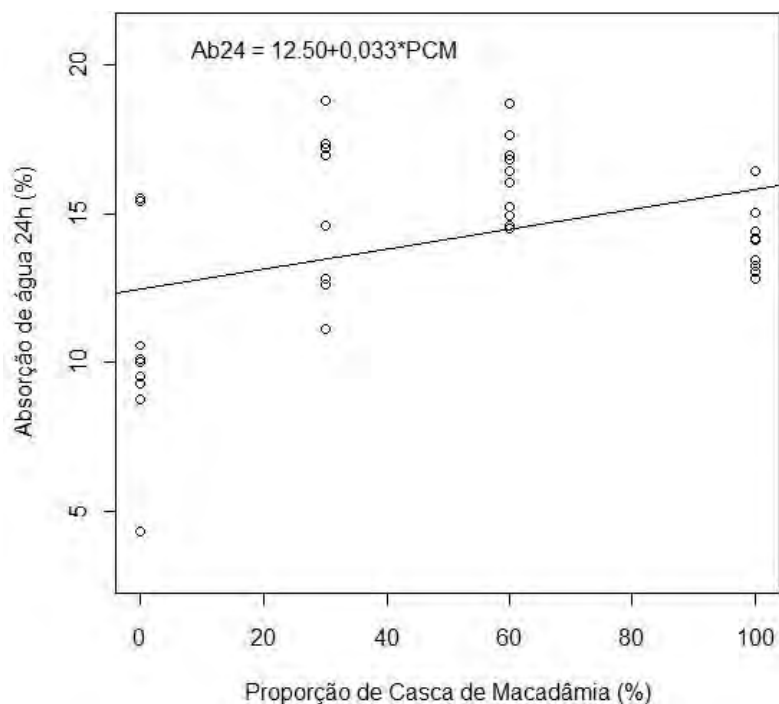


FIGURA 40 – Gráfico de regressão linear para a absorção de água de 24 horas.

O que se pode perceber pelos gráficos apresentados nas Figuras 39 e 40 é que houve um aumento na absorção de água com o aumento da proporção de partículas de casca de noz macadâmia, assim como ocorreu com o inchamento em espessura. Essa tendência é confirmada pela análise de variância da regressão tanto para absorção de água por 2h ($F_{1,36} = 6,44$; $p < 0,05$) quanto por 24h ($F_{1,35} = 6,9$; $p < 0,05$), confirmando que realmente há uma dependência entre as variáveis. Entretanto os modelos apresentados não mostraram ajustes muito bons, ambos tiveram um coeficiente de determinação $R^2 = 0,15$, e isto pode ser justificado pela alta variação dos resultados.

A absorção de água também é influenciada, assim como o inchamento, pela espessura das partículas, portanto como as partículas de macadâmia mostraram-se mais espessas, um aumento da sua quantidade ocasionou aumento na absorção de água. Outro fator que influencia é quantidade de vazios, quanto maior for a quantidade de vazios, mais espaço haverá para o alojamento da água dentro do painel, portanto, maior será a absorção da água. As partículas de macadâmia também deixaram o painel com maior quantidade de vazios e isso ocasionou, portanto, uma maior absorção de água pelos corpos de prova, o que também foi comprovado por Moslemi (1974).

5.4. Ensaios mecânicos

A seguir estão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização mecânica de flexão estática e tração perpendicular. A Tabela 4 apresenta os valores médios e os desvios padrões dos ensaios mecânicos realizados para os quatro tratamentos.

TABELA 4 – Valores médios dos ensaios mecânicos realizados para cada tratamento.

Ensaio		Tratamentos			
		1	2	3	4
Flexão Estática	MOR (MPa)	14,16 (3,43)	9,2 (1,92)	5,26 (0,91)	1,83 (0,90)
	MOE (MPa)	4163,78 (929,23)	508,12 (191,31)	304,66 (178,67)	60,11 (67,80)
Adesão Interna (MPa)		1,67 (0,28)	1,09 (0,20)	0,63 (0,25)	0,69 (0,28)

* Os valores apresentados entre parênteses representam os desvios padrões de cada tratamento.

5.4.1. Flexão estática

Na Figura 41 e 42 estão apresentados os gráficos com a reta ajustada da regressão linear para os valores de MOR e de MOE, respectivamente.

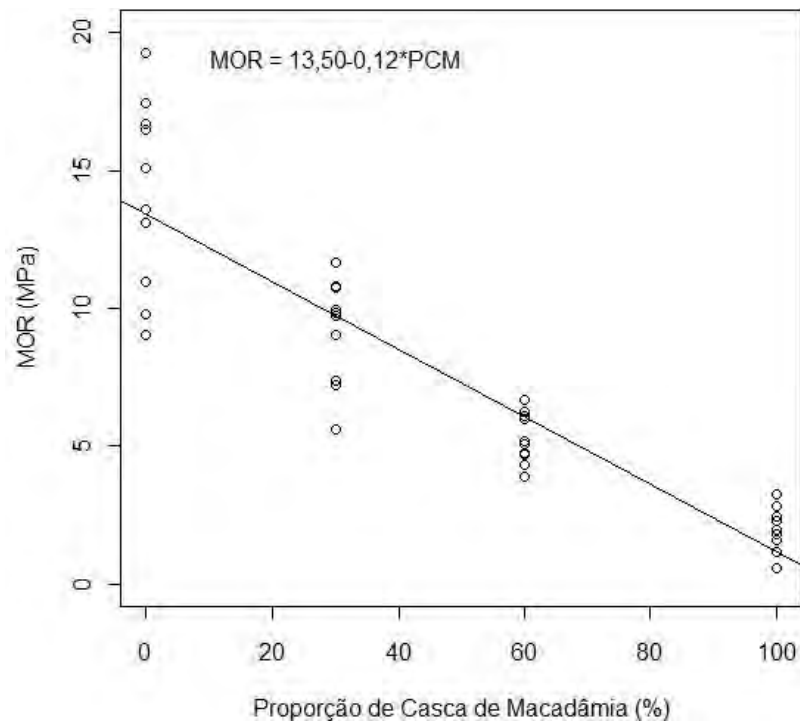


FIGURA 41 – Gráfico de regressão linear para o Módulo de Ruptura.

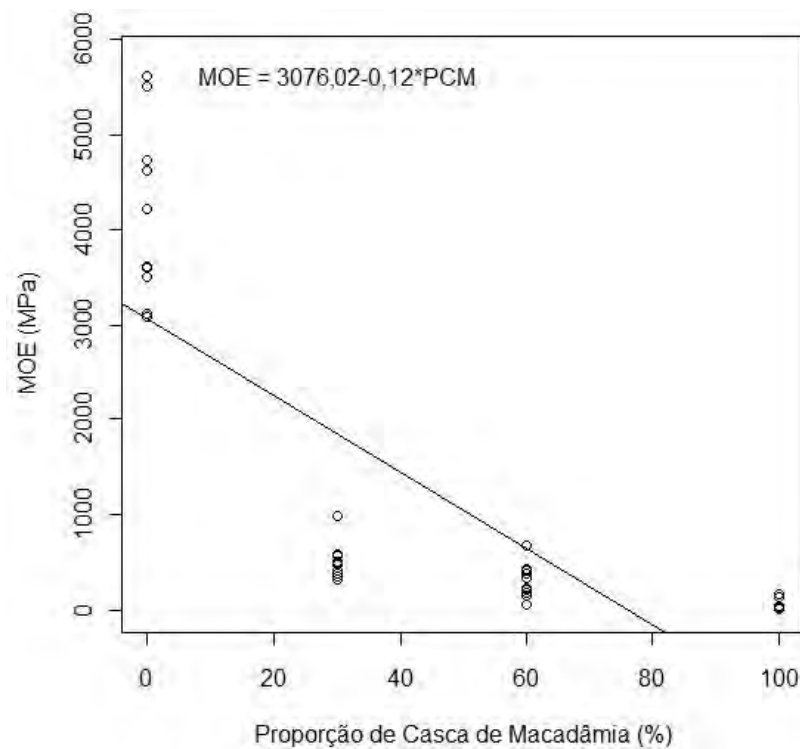


FIGURA 42 - Gráfico de regressão linear para o Módulo de Elasticidade.

Como pode ser observado em ambos os gráficos das Figuras 41 e 42, houve uma tendência de diminuição do MOR e do MOE com o aumento da proporção de casca, o que foi confirmado pela análise de variância da regressão tanto para o MOR ($F_{1,38} = 180,9$; $p < 0,05$), quanto para o MOE ($F_{1,34} = 51,15$; $p < 0,05$), mostrando que houve dependência entre as

variáveis a um nível de significância de 5%. Além disso, o coeficiente de determinação encontrado para o MOR ($R^2 = 0,83$) mostrou um bom ajuste do modelo para 83% dos dados obtidos. Entretanto, o coeficiente de determinação para o MOE ($R^2 = 0,60$) não apresentou um ajuste tão bom.

Guimarães Junior et. al. (2011) produziram painéis de partículas de três espécies diferentes de Eucalipto, entre elas o *Eucalyptus saligna*. Para esta madeira obtiveram o valor médio do MOR de 14,7 MPa, muito próximo ao obtido para o painel de 100% de eucalipto deste estudo.

O MOE para os painéis produzidos com 100% de macadâmia, não pôde ser obtido para todos os 10 corpos de prova, pois durante os ensaios a máquina não pôde obter a deformação de quatro destes corpos de prova, pois os mesmos romperam antes que alguma deformação pudesse ser adquirida.

A diminuição tão abrupta do MOE pode ser justificada pelo fato da casca ser um material com menor plasticidade que a madeira, ou seja, mais rígido, o que acarretou em uma colagem de menor qualidade, influenciando na capacidade de deformação do material, ou seja, ele suportou menor deformação elástica, devido ao fato de que esta deformação não pôde ser distribuída uniformemente dentro do material, já que este possuía maior quantidade de espaços vazios, quanto maior a quantidade de partículas de macadâmia.

Um estudo realizado por Haselein et. al. (2002) no qual se estudou a resistência mecânica e a umidade de painéis particulados de madeira com diferentes tamanhos de partículas, notou-se que as propriedades de flexão relativas ao MOE e MOR das chapas foram diretamente proporcionais ao comprimento das partículas e inversamente proporcionais a sua espessura. Com isso nota-se que a adição de partículas promoveu a diminuição destas propriedades devido à sua geometria, menor comprimento e maior espessura.

Em um estudo realizado por Melo et. al. (2009) no qual adicionou-se proporções de casca de arroz em painéis de partículas de madeira também apresentou a mesma tendência de diminuição das propriedades de MOR e MOE, devido principalmente a dificuldade de colagem das partículas de arroz. Essa dificuldade de colagem, ou de interação do adesivo com as partículas, também pode ser um dos motivos pelos quais a adição de casca de noz macadâmia influenciou negativamente nas propriedades de flexão estática.

Gürü, Tekeli e Bilici (2005) também utilizaram a casca de uma oleaginosa, neste caso a amêndoa, para a produção de painéis de partículas com 100% da casca deste material. Notou-se que o valor de MOR apresentou-se ainda menor em comparação ao valor obtido no presente estudo, 0,84 MPa, mostrando que comparados aos painéis de casca de amêndoas, os

painéis de casca de macadâmia apresentaram-se com valores de MOR superiores, entretanto ainda muito abaixo das especificações normativas com 100% de macadâmia.

5.4.2. Tração perpendicular ou adesão interna (MPa)

No gráfico da Figura 43 está apresenta a reta ajustada da regressão linear para os valores de adesão interna.

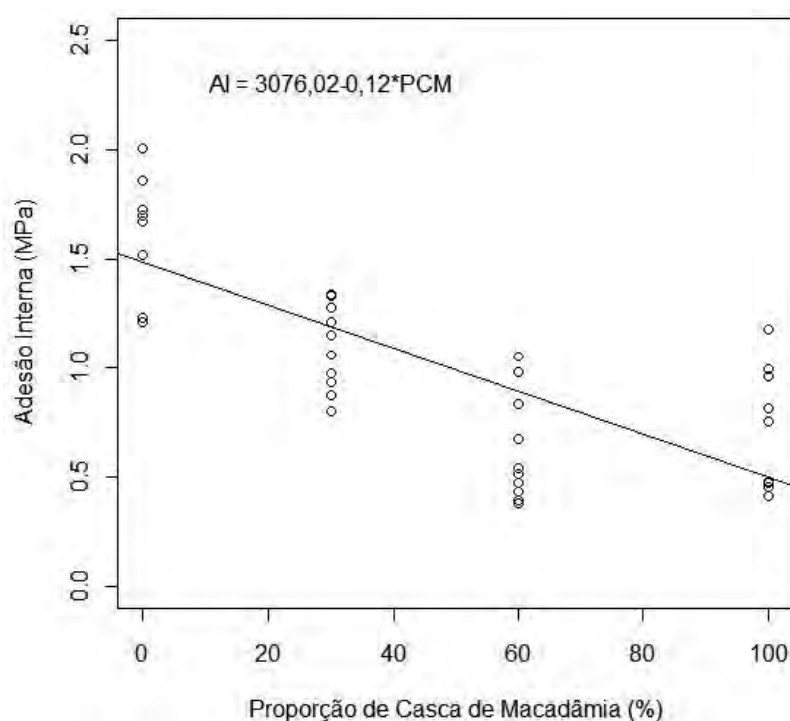


FIGURA 43 – Gráfico de regressão linear para a adesão interna

Como pode ser observado no gráfico da Figura 43, houve uma tendência de diminuição da adesão interna com o aumento da proporção de casca, o que foi confirmado pela análise de variância da regressão ($F_{1,38} = 53,21$; $p < 0,05$), mostrando que houve dependência entre as variáveis a um nível de significância de 5%. Entretanto, o coeficiente de determinação para o MOE ($R^2 = 0,58$) não apresentou um ajuste tão bom, causado pela variação dos dados.

Esse comportamento de diminuição da adesão interna com o aumento da proporção de casca se deve principalmente a geometria das partículas de casca de noz macadâmia e da sua densidade. Em primeiro lugar, partículas com comprimentos menores possuem menor área

superficial de contato e a alta densidade da partícula dificulta a sua compactação, resultando assim em maior quantidade de espaços vazios e menor adesão entre as partículas, o que pode ser claramente visto na Figura 44. Haselein et. al. (2002) observaram em seu estudo que os valores de adesão interna foram inversamente proporcionais ao aumento da espessura das partículas, com isso pode-se notar que a diminuição da adesão interna também foi devido ao aumento da proporção das partículas de macadâmia, pois estas possuíam espessura maior.



FIGURA 44 – Corpos de prova de adesão interna rompidos; (a) 0% macadâmia; (b) 70% macadâmia.

E pelos resultados de teor de extrativos obtidos, apresentados na Tabela 2, percebe-se também que a diminuição nas propriedades de adesão interna não foi devido a esta propriedade, já que os painéis com 100% de eucalipto apresentaram maior adesão interna, apesar das partículas de eucalipto possuírem maior porcentagem de teor de extrativos.

No entanto, mesmo os painéis com 100% de casca de noz macadâmia, apresentaram com valores acima dos exigidos pela ABNT NBR 18401-2 (2006), que é de 0,40 MPa.

Melo et. al. (2009) que produziu painel de partículas com casca de arroz notou também que a adição da casca de arroz diminui a resistência à tração perpendicular, o que pôde ser devido principalmente à baixa permeabilidade da partícula e por ela ser cilíndrica e oca, o que ocasionou espaços vazios. O que pôde também ser notado nas partículas de macadâmia, que possuem baixa permeabilidade por ser de alta densidade, e por deixar muito espaços vazios no painel produzido, fatores estes que podem ter influenciado na diminuição da adesão interna conforme foram sendo adicionadas ao painel.

5.5. Considerações finais

Com os resultados obtidos pôde-se perceber que o painel de madeira com adição de macadâmia, nas porcentagens estudadas, não possui boa resistência mecânica e boa estabilidade dimensional. Portanto, mostra-se como um material não indicado em solicitações que necessitam de alta resistência mecânica, por exemplo, a produção de móveis, o qual consiste no principal setor consumidor dos painéis de partículas.

No entanto, por apresentar um aspecto bonito, se comparados aos painéis produzidos somente com as partículas de eucalipto (Figura 29), poderia ser utilizado como painel decorativo, por exemplo, na fabricação de lambris, também para a fabricação de pequenos objetos, com o intuito principal do aproveitamento de resíduos.

6. CONCLUSÃO

Através deste trabalho pôde-se concluir de modo geral que a adição de casca de noz macadâmia na produção de painéis de partículas reduziu o desempenho físico-mecânico dos painéis.

Através da análise da razão de esbeltez pôde-se notar que as partículas de noz macadâmia apresentaram-se com menor razão de esbeltez. Pode-se concluir também que os extrativos não interferiram no desempenho dos painéis.

A adição de casca de noz macadâmia promoveu aumento nas propriedades de inchamento em espessura e absorção de água

O MOR e o MOE foram diretamente influenciados com o aumento da proporção da casca de macadâmia. Tanto o MOR quanto o MOE apresentaram uma elevada diminuição e o MOE obteve uma queda abrupta com a adição da casca.

A adesão interna, por sua vez, foi também influenciada negativamente pela adição da casca. Entretanto, mesmo os painéis com 100% de casca macadâmia, ainda apresentaram valores de adesão interna acima dos exigidos pela ABNT NBR 18401-2 (2006), sendo a única característica do painel estudado a atender especificação normativa com a adição das cascas.

Concluí-se, portanto, que a casca de noz macadâmia nas proporções utilizadas não se apresenta como um bom resíduo para a produção de painéis de partículas de madeira que atenda as especificações normativas para uso na indústria moveleira e construção civil.

No entanto, para próximos estudos, sugere-se a adição de pequenas quantidades deste material, em proporções de, por exemplo, 5%, 10% e 15% para a produção dos painéis, testando assim se poderiam ser utilizados em pequenas quantidades. Sugere-se ainda a realização de tratamentos físico-químicos, como a lavagem em água quente, nas partículas de macadâmia, para melhorar a sua adesão e a utilização de outro adesivo mais resistente à umidade e que preencha mais os espaços vazios, como o adesivo poliuretano à base de mamona. E por fim recomenda-se que na etapa de produção dos painéis, a pressão de prensagem seja aumentada de modo a tentar uma maior interação entre as partículas e assim, reduzir os vazios.

Vale destacar que os painéis produzidos não atenderam as especificações da ABNT NBR 18401-2 (2006), mas, algumas aplicações que não exijam elevada solicitação permitem o uso dos painéis estudados, como por exemplo, painéis decorativos, pequenos objetos e artesanatos.

REFERÊNCIAS

ARABI, M.; FAEZIPOUR, M.; GHOLIZADEH, H. Reducing resin content and board density without adversely affecting the mechanical properties of particleboard through controlling particle size. **Journal of Forestry Research**, China, v. 22, n. 4, p. 659-664, mar. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. **Nossas unidades industriais**. Disponível em: < <http://www.abipa.org.br/industrias.php>>. Acesso em: 12 fev. 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA - ABIPA. **MDP**. Disponível em: < <http://www.abipa.org.br/produtosMDP.php>>. Acesso em: 12 fev. 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: Chapas de madeira aglomerada, parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-3**: Chapas de madeira aglomerada, parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

BALDWIN, R. F. **Plywood and veneer-based products**: Manufacturing Practices. San Francisco: Miller Freeman Inc., 1995.

BISWAS, D.; BOSE, S. K.; HOSSAIN, M. M. Physical and mechanical properties of urea formaldehyde-bonded particleboard made from bamboo waste. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, [S.l.], v. 31, n. 2, p. 84-87, mar. 2011.

CAI, Z.; WU, Q.; LEE, J. N.; HIZIROGLU, S. Influence of board density, mat construction, and chip type on performance of particleboard made from eastern redcedar. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 14, p. 226-232, dec. 2004.

COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL – CATI. Distribuição geográfica de área cultivada e número de produtores, 2007/2008. In: **Levantamento Censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo**, 2009. Disponível em: <http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/mapaculturas/pdf/Macadamia.pdf>. Acesso em: 5/02/2013.

COLLI, A.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, J. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; LUCIA, R. M. D. Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de paricá

(*Schyzolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) e fibras de coco (*Cocos nucifera* L.). **Rev. Árvore**, Viçosa, v.34, n.2, p. 333-338, mar.-abr. 2010.

DONG, C.; DAVIES, I. J. Flexural properties of macadamia nutshell particle reinforced polyester composites. **Composites: Part B**, [S.l.], v. 43, n. , p. 2751-2756, 2012.

FRANÇA, B. H. C. **Macadâmia**: cultivo e produtos derivados. Rio de Janeiro: REDETEC, 2007. 21 p.

FRIHART, R. C. Wood Adhesion and Adhesives. In: ROWELL, M. R. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2012. Cap. 9.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with Wood Materials: Bond Formation and Performance. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook**: wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 10.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: Document Center Xerox – USC, 2000. 242 p.

GARCÍA-ORTUÑO, T.; ANDRÉU-RODRIGUES, J.; FERRÁNDEZ-GRACÍA, M. T.; FERRÁNDEZ-VILLENA, M.; FERRÁNDEZ-GRACÍA, C. E. Evaluation of physical and mechanical properties of particleboard made from Giant Reed (*Arundo Donax* L.). **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 1, p. 477-486, fev. 2011.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; MORI, F. A. Painéis de madeira aglomerada de resíduos da laminação de diferentes procedências de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 443-452, out./dez. 2011.

GÜRÜ, M.; TEKELI, S.; BILICI, I. Manufacturing of urea-formaldehyde-based composite particleboard from almond shell. **Materials & Design**, [S.l.], v. 27, n. 10, p. 1148-1151, 2006.

HASELEIN, C. R.; CALEGARI, L.; BARROS, M. V.; HACK, C.; HILLIG, E.; PAULESKI, D. T.; POZZERA, F. Resistência mecânica e à umidade de painéis aglomerados com partículas de madeira de diferentes dimensões. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.2, p. 127-134, jul. 2002.

INTERNATIONAL NUT & DRIED FRUIT. **Global Statistical Review 2006-2011**, 2010 Disponível em: <http://www.nutfruit.org/global-statistical-review_13608.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras: *Eucalyptus saligna***. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/60.htm>. Acesso em: 12 fev. 2013.

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

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

IWAKIRI, S.; STINGHEN, A. B. M.; SILVEIRA, E. L.; ZAMARIAN, E. H. O.; PRATA, J. G.; BRONOSKI, M. Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 387-393, jul.-set. 2008.

JENNINGS, J.S.; MACMILLAN, N.H. A tough nut to crack. **Journal of Materials Science**, [S.l.], v. 21, n. 5, p. 1517-1524, may 1986.

LIMA, A.M. Utilização de fibras (epicarpo) de babaçu como matéria-prima alternativa na produção de chapas de madeira aglomerada. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 645-650, ago. 2006.

MACHADO, J. S. **Placas de derivados de madeira**: tipos de placas e sua especificação. Lisboa: LNEC Divisão de edições e Artes Gráficas, 2005.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry-process fiberboard**. 2. ed. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 681p.

MELO, R. R.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; STANGERLIN, D. M. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 449-460, out.-dez. 2009.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. Carbondale: Southern Illinois University Press, 1974. V. 2, 245p.

NAGAO, M. A. Farm and Forestry Production and Marketing Profile for Macadamia Nut (*Macadamia integrifolia* and *M. tetraphylla*). In: ELEVITCH, C.R. **Specialty Crops for Pacific Island Agroforestry**. Holualoa, HI: Permanent Agriculture Resources, 2011. Disponível em: <http://agroforestry.net/scps/>.

PIRAYESH, H.; KHAZAEIAN, A. Using almond (*Prunus amygdalus* L.) shell as a bio-waste resource in wood based composite. **Composites Part B: Engineering**, [S.l.], v. 43, n. 3, p. 1475-1479, abr. 2012.

POINERN, G. E. J.; SENANAYAKE, G.; SHAH, N.; THI-LE, X. N.; PARKINSON, G. M.; FAWCETT, D. Adsorption of the aurocyanide, $\text{Au}(\text{CN})_2$ complex on granular activated carbons derived from macadamia nut shells: A preliminary study. **Minerals Engineering**, [S.l.], v. 24, n. 15, p. 1694-1702, dec. 2011.

SMALL, E. Macadamia Nut. In: _____. **Top 100 Exotic Food Plants**. Boca Raton: CRC Press, 2011. cap. 60, p. 373-379.

SOBIERAJSKI, G. R.; FRANCISCO, V. L. F. S.; ROCHA, P.; GHILARD, A. A.; MAIA, M. L. Noz macadâmia: produção, mercado e situação no estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 36, n. 6, p. 25-36, maio 2006.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials: Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood–Nonwood Composite Materials. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 11.

STEPHENSON, R. A. Nuts. In: CABALLERO, B. **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2003. p. 4205-4212.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE AMERICAN PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI**: TAPPI Standard methods. Atlanta, 2001. CD-ROM.

TOLES, C. A.; MARSHALL, W. E.; JOHNS, M. M. Phosphoric acid activation of nutshells for metals and organic remediation: process optimization. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, [S.l.], v. 72, n. 3, p. 255-263, jul. 1998.

WANG, C.H.; MAI, Y.W. Deformation and fracture of Macadamia nuts, Part 2: Microstructure and fracture mechanics analysis of nutshell. **International Journal of Fracture**, [S.l.], v. 69, n. 1, p. 67–85, mar. 1994.

ZHENG, Y.; PAN, Z.; ZHANG, R.; JENKINS, B. M.; BLUNK, S. Particleboard quality characteristics of saline jose tall wheatgrass and chemical treatment effect. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 98, n. 6, p.1304-1310, abr. 2007.