

EMERSON GOMES MILAGRES

**COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*,
POLIPROPILENO E POLIETILENO DE ALTA E BAIXA DENSIDADE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2004

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M637c
2004

Milagres, Emerson Gomes, 1976-

Compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidade / Emerson Gomes Milagres. – Viçosa : UFV, 2004. ix, 73f. : il. ; 29cm.

Orientador: Benedito Rocha Vital.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 66-69.

1. Madeira aglomerada. 2. Refugo de plástico - Reaproveitamento. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 20.ed. 634.9862

EMERSON GOMES MILAGRES

**COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*,
POLIPROPILENO E POLIETILENO DE ALTA E BAIXA DENSIDADE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 31 de agosto 2004.

Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Conselheiro)

Prof. Alexandre Santos Pimenta
(Conselheiro)

Prof. Helio Garcia Leite

Prof. José de Castro Silva

Prof. Benedito Rocha Vital
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A DEUS.

Aos meus pais, José Geraldo Pereira Milagres e Dalva Helena Gomes Sampaio Milagres.

À Elaine, pela companhia e paciência durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa.

Ao professor Benedito Rocha Vital, pela orientação, dedicação e amizade.

Aos professores Alexandre Santos Pimenta, José de Castro Silva, Helio Garcia Leite e Ricardo Marius Della Lucia.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira e Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira: Aristeu, Hésio, Maninho, Osvaldo e Gilberto.

Ao Mariano, pela ajuda nos momentos difíceis.

Aos companheiros de laboratório: Angélica de Cássia, Carla, Fernando, Henrique e Roberta.

A todos os demais estudantes, professores e amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Emerson Gomes Milagres, nascido no dia 3 de janeiro de 1976, filho de José Geraldo Pereira Milagres e Dalva Helena Gomes Sampaio Milagres, é natural de São Miguel do Anta-MG, onde concluiu o ensino fundamental na Escola Estadual Dr. Raimundo Alves Torres; o ensino médio foi realizado no Colégio Universitário Coluni, em Viçosa-MG.

Em 1997, ingressou no curso de graduação de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

Em setembro de 2002, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em agosto de 2004.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Aglomerados	4
2.1.1. Definição	4
2.1.2. Fatores que influenciam a qualidade final do painel.....	5
2.1.2.1. Espécie.....	5
2.1.2.2. Geometria das partículas.....	7
2.1.2.3. Umidade das partículas	8
2.1.2.4. Adesivos	9
2.1.2.5. Aditivos.....	10
2.1.2.6. Prensagem	11
2.2. Plásticos	13
2.3. Resinas termoplásticas	14
2.3.1. Polipropileno (PP).....	14
2.3.2. Polietileno (PE).....	16
2.4. Reciclagem do plástico.....	17
2.5. Compósitos	21
2.5.1. Materiais compósitos.....	21
2.5.2. Compósito plástico/madeira	22
2.5.3. Adesão plástico/madeira	24
2.5.4. Produção de compósito plástico/madeira	27
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1. Densidade	35
5.2. Umidade	35

	Página
5.3. Tração perpendicular	37
5.4. Arrancamento de parafuso	40
5.5. Dureza Janka	41
5.6. Resistência à flexão estática	44
5.6.1. Módulo de ruptura (MOR).....	44
5.6.2. Módulo de elasticidade (MOE)	46
5.7. Absorção de água e inchamento em espessura	49
5.7.1. Absorção de água após 2 e 24 horas.....	49
5.7.2. Inchamento em espessura após 2 e 24 horas.....	53
5.8. Adsorção de vapor d'água e inchamento em espessura.....	58
5.8.1. Adsorção de vapor d'água.....	58
5.8.2. Inchamento em espessura	61
5.9. Expansão linear.....	63
6. CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
APÊNDICE A	70

RESUMO

MILAGRES, Emerson Gomes, M.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2004. **Compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidade.** Orientador: Benedito Rocha Vital. Conselheiros: Ricardo Marius Della Lucia e Alexandre Santos Pimenta.

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade de se utilizar o plástico reciclado para produção de painéis aglomerados. Para tanto foram fabricados painéis de madeira/plástico, empregando-se três tipos de resinas termoplásticas (polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polipropileno (PP)), em três níveis (0, 25 e 50%), e três tipos de adesivo (uréia-formaldeído, uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi e fenol-formaldeído), utilizando 8% de sólidos resinosos sobre a massa total de partículas. Em todos os painéis foi aplicado 0,5% de parafina, que foi calculada com base na porcentagem de madeira empregada na produção dos painéis. Foram produzidos 42 painéis com dimensões aproximadas de 40 x 40 x 1 cm, com densidade média de 0,74 g/cm³, constituindo um total de 21 tratamentos, com duas repetições. As propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram determinadas em conformidade com a norma ASTM D-1037-91. Os resultados dos testes mecânicos foram comparados com os valores mínimos estabelecidos pela norma ANSI/A 208.1-1993 (*Wood Particleboard*), e os resultados

dos testes de absorção de água e inchamento em espessura foram comparados com os valores máximos estabelecidos pelas normas DIN 68m761 (1) – 1961 (Santana e Pastore, 1981) e CSA 0437-1993, respectivamente. À exceção do módulo de elasticidade, os valores experimentais das propriedades mecânicas ultrapassaram os valores mínimos requeridos pela norma ANSI/A1-280/93. Para o inchamento em espessura, observou-se que, de modo geral, os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas não ultrapassaram o valor máximo estabelecido pela norma DIN 68m761 (1), no entanto para absorção de água após 24 horas de imersão constatou-se que todos os painéis ultrapassaram o valor máximo estabelecido pela norma CSA 0437-1993. A adição de 0,5% de epóxi no adesivo de uréia-formaldeído aumentou significativamente a resistência à flexão estática dos painéis produzidos com PP. Já os painéis produzidos com fenol-formaldeído absorveram, significativamente, maior porcentagem de água do que aqueles produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi. Os painéis produzidos com PEAD apresentaram menor porcentagem de absorção de água, menor inchamento em espessura, maior resistência à tração perpendicular, maior resistência ao arrancamento de parafuso e maior resistência à flexão estática. Entretanto, para a dureza Janka, os painéis com 50% de PP, contendo os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, apresentaram resistência significativamente superior à dos painéis produzidos com PEAD e PEBD. O acréscimo de 25 para 50% no teor de plástico diminuiu a resistência dos painéis para tração perpendicular, arrancamento de parafuso e resistência à flexão estática. Já para o teste de dureza Janka observou-se que os painéis com PP, contendo os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, tiveram aumento na resistência.

ABSTRACT

MILAGRES, Emerson Gomes, M.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2004. **Particleboard composites of *Eucalyptus grandis* lumber, polypropylene and high and low density polyethylene.** Adviser: Benedito Rocha Vital. Committee Members: Ricardo Marius Della Lucia and Alexandre Santos Pimenta.

The objective of this study was to evaluate the viability of the use of recycled plastic for the production of particleboards. To reach this goal boards of wood/plastic were made using three types of thermoplastic resins (high density polyethylene (PEAD), low density polyethylene (PEBD), and polypropylene (PP) at three levels (0, 25 and 50%), and three types of adhesives (urea-formaldehyde, urea-formaldehyde + 0.5% epoxy, and phenol-formaldehyde), using 8% of resinous solid upon the total mass of particles. In all of the boards 0.5% of paraffin was applied, the calculation of which was based on the percentage of lumber used in the production of the boards. A total of 42 boards with dimension of around 40x40x1cm, with a mean density of 0.74 g/cm³ were produced. This constituted a total of 21 treatments with two repetitions. The physical and mechanical properties of the boards were determined according to the ASTM D-1037-91 norm. The result of the mechanical tests were compared with the minimal values established by the ANSI/A 208.1-1993 norm (Wood Particleboard), and the result of the water

absorption and swelling in thickness were composed with the maximum values established by the DIN 68m761(1)-1961 (Santana & Pastore, 1981), and CSA 0437-1993 norms, respectively. Excluding the elasticity modules, the tested values of the mechanic properties surpassed the minimal value established by the ANSI/A1-280/93. It was observed that, in general, for swelling in thickness, the boards produced with 50% of thermoplastic resins did not surpass the maximum value established by the DIN 68N761(1) norm, but for water absorption after 24 hours in immersion all the panels surpassed the maximum value established by the CSA 0437-1993 norm. The addition of 0.5% of epoxy in the urea-formaldehyde adhesive increased significantly the resistance to static bending of the boards produced with PP. Yet the boards produced with phenol-formaldehyde absorbed significantly a greater percentage of water than those produced with urea-formaldehyde and urea-formaldehyde + 0.5% epoxy adhesives. The boards produced with PEAD showed a smaller percentage of water absorption, less swelling in thickness, greater resistance to perpendicular traction, greater resistance to screw and grater resistance to static bending, but, for the Janka hardness, the boards with 50% of PP, containing the urea-formaldehyde and the urea-formaldehyde +0.5% of epoxy adhesives, showed a resistance significantly greater than those produced with PEAD and PEBD. The addiction of 25 to 50 % in the plastic content decreased the resistance of the boards for the perpendicular traction, screw pull and resistance to static bending. Yet for the Tanka hardness test it was observed that the boards with PP containing the urea-formaldehyde and urea-formaldehyde + 0.5% of epoxy adhesives showed an increase in resistance.

1. INTRODUÇÃO

Desde a Pré-História o homem utiliza a madeira para diversos fins e sob inúmeras formas. O crescimento da civilização humana, com o transcorrer dos tempos, ocasionou o aumento da demanda de insumos florestais e, ao mesmo tempo, conduziu à progressiva devastação de áreas florestadas, gerando a necessidade de encontrar meios mais racionais para se aproveitar a madeira.

A produção de laminados e, em especial, de chapas de partículas aglomeradas permite o melhor aproveitamento da madeira e de seus resíduos gerados durante o seu processamento.

Os primeiros estudos sobre chapas de partículas foram realizados na Alemanha, no final do século XIX, e desde o seu surgimento, até meados da década de 1930, foram realizadas muitas pesquisas e desenvolvidos novos processos de produção, nos quais se buscava adequar as matérias-primas ao processo ideal para obtenção de painéis de melhor qualidade (MACIEL, 2001).

Em 1936, Loerstscher realizou estudos interessantes sobre a produção de chapas de partículas em um sistema automatizado; no mesmo ano, a indústria *Farley e Loetscher Manufacturing Col* iniciou a produção em Dubuque, estado de Iowa (SILVA, 2000). Tal fato permitiu um grande avanço na indústria de painéis.

Em 1941 e 1942, iniciou-se na Alemanha e nos Estados Unidos, respectivamente, a produção comercial de painéis de madeira aglomerada, buscando o aproveitamento de resíduos e madeiras excedentes de serrarias e

laminadoras. Por causa da Segunda Guerra Mundial, a produção de chapas de partículas foi praticamente paralisada, dando-se maior ênfase à produção de painéis compensados, que seriam empregados na indústria aeronáutica da época (MACIEL, 2001). Após a Segunda Guerra, a indústria de chapas de partículas retomou o seu crescimento e na década de 1960 iniciou-se a expansão maciça dessa indústria nos Estados Unidos e no resto do mundo (SILVA, 2000).

Atualmente o uso de produtos à base de materiais lignocelulósicos, como o aglomerado, tem sido crescente, pois além de conseguir o melhor aproveitamento da madeira eles apresentam certas vantagens em relação a outros materiais, por serem renováveis, recicláveis e biodegradáveis (ELEOTÉRIO, 2000).

Por outro lado, a tendência mundial tem sido procurar o melhor aproveitamento de resíduos urbanos, buscando-se novas matérias-primas e tecnologias de produção para geração de novos produtos. Dentre esses resíduos urbanos, o plástico merece uma atenção especial, devido ao crescente aumento do seu consumo. O Brasil produziu, em 2002, cerca de 3,9 milhões de toneladas de plástico (CEMPRE, 2004), deste total cerca de 17,5% são reciclados (REICLÁVEIS, 2004). Os plásticos, depois de utilizados, são descartados como resíduo pós-consumo, e por não serem biodegradáveis tornam-se um sério problema ambiental.

Um dos possíveis usos para o plástico residual é a fabricação de compósito plástico/madeira. Esses produtos podem ser obtidos a partir de uma matriz contínua ou descontínua de resina termoplástica, reforçada com partículas de madeira. Os produtos assim obtidos associam as melhores qualidades de cada constituinte e se caracterizam por apresentar propriedades peculiares que os distinguem de outros materiais.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas e físicas de compósitos produzidos por termocompressão, utilizando partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* em mistura com partículas de resinas termoplásticas, do tipo polipropileno e polietileno de alta e baixa densidade. Os objetivos específicos foram:

- Analisar o efeito do uso de três tipos de adesivos (uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% epóxi e fenol-formaldeído) nas propriedades dos compósitos.
- Determinar a influência das diferentes resinas termoplásticas (polipropileno e polietileno de alta e baixa densidade) nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos formados.
- Avaliar o efeito da utilização de partículas de resinas termoplásticas (polipropileno e polietileno de alta e baixa densidade) em diferentes proporções (25 e 50%), como substituto parcial de partículas da madeira de *Eucalyptus grandis*.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aglomerados

2.1.1. Definição

O painel aglomerado é um produto composto de fragmentos de madeira ou de outros materiais lignocelulósicos, unidos com adesivos de resina sintética, na presença de calor e pressão (CARNOS, 1988). Os fragmentos de madeira são geralmente formados por fibras e partículas, estas últimas dispostas aleatoriamente, gerando as chapas de partículas aglomeradas convencionais.

Segundo MOSLEMI (1974), os materiais lignocelulósicos usados na fabricação de chapas de partículas podem ser classificados como:

a) Partículas: fragmentos de madeira, variando entre 1,3 e 12,7 mm de comprimento, com largura e espessura de 0,13 a 1,3 mm, respectivamente.

b) Serragem: partículas que possuem comprimento, largura e espessura aproximadamente iguais.

c) Aparas: partículas finas, não possuindo medidas padronizadas, resultantes das inúmeras operações de acabamento da madeira.

d) Flocos: partículas planas, retangulares e finas, apresentando dimensões compreendidas nas seguintes faixas: comprimento entre 25 e 100 mm, largura entre 10 e 25 mm e espessura entre 0,2 e 0,4 mm.

e) Lã de madeira: partículas longas e finas com, aproximadamente, 250 mm de comprimento, 5 mm de largura e 0,5 mm de espessura.

f) Strands: lâminas relativamente compridas, usadas na fabricação de painéis com partículas orientadas do tipo OSB (*oriented strand board*), apresentam as seguintes dimensões: comprimento variando de 12,7 a 76,2 mm, largura de 6,4 a 25,4 mm e espessura de 0,25 a 0,64 mm.

g) Cavacos: são fragmentos de madeira, com comprimento variando de 12 a 25 mm, largura de 1 a 5 mm e espessura um pouco menor.

2.1.2. Fatores que influenciam a qualidade final do painel

2.1.2.1. Espécie

Segundo MALONEY (1993), a espécie botânica é uma das variáveis mais importantes no processo de produção de painéis, interagindo com todas as outras variáveis no processo, e determina a densidade do painel.

De acordo com MOSLEMI (1974), a madeira é a principal fonte de matéria-prima utilizada na confecção de chapas aglomeradas. Embora não exista nenhuma propriedade inerente à madeira que sirva como indicador preciso da adequação de determinada espécie para esse fim, sabe-se que a densidade é a propriedade que oferece maior número de informações, pois interfere em quase todas as propriedades físicas e mecânicas do produto elaborado.

HSE (1975), ao analisar as propriedades das chapas produzidas a partir de nove tipos de madeira, afirmou que a densidade é um dos fatores preponderantes na qualidade final dos painéis. Espécies de baixa densidade são compactadas mais facilmente quando prensadas, produzindo bom contato entre as partículas e uma conseqüente melhoria na resistência à tração perpendicular. O uso de espécies com densidade superior a $0,6 \text{ g/cm}^3$ torna difícil a formação de painéis, sem aumentar, demasiadamente, a densidade das chapas.

Em geral, as espécies de madeira empregadas nas indústrias de chapas aglomeradas apresentam densidade que varia de 0,40 a $0,60 \text{ g/cm}^3$. Para espécies com densidade fora deste intervalo é recomendada uma mistura em

proporções adequadas com outras madeiras, de modo a obter a densidade final desejada (VITAL, 1974).

A espécie de madeira afeta, também, a estabilidade dimensional das chapas. Como tal propriedade diminui com o aumento da densidade, parece lógico que espécies com maiores densidades resultem em painéis mais instáveis. Outras variáveis, no entanto, podem interagir com a densidade da madeira, resultando em chapas com diferente estabilidade dimensional daquela esperada para a espécie.

O pH da madeira é outra variável importante a ser considerada, pois a madeira com pH muito ácido pode alterar o pH do adesivo, interferindo negativamente no seu processo de cura. O adesivo à base de uréia-formaldeído é um exemplo típico da interferência do pH da madeira no seu processo de cura.

Outro fator inerente à escolha de espécies para fabricação de painéis é o teor de extrativo da madeira. Segundo SJOSTROM (1993), os extrativos fazem parte da estrutura da madeira e incluem taninos e outros polifenólicos, substâncias corantes, óleos essenciais, gorduras, resinas, graxas, gomas, amido etc. O autor cita que os extrativos na madeira variam, em proporção quantitativa, de 5 a 30% e podem ser removidos com solventes adequados.

Problemas podem ocorrer no consumo de resina e na sua taxa de cura, nos casos em que o tipo de extrativos e suas variações quantitativas representam uma importante parte no processo produtivo. Adicionalmente pode ser observada baixa resistência à umidade nos produtos acabados, bem como problemas relacionados com o estouro de painéis durante a prensagem. Tais problemas devem ser avaliados quando se utilizam espécies que apresentam extrativos que afetem negativamente o processo de composição do painel. A título de exemplo, a *Thuja plicata* é uma espécie que possui extrativos com material volátil, que se vaporiza durante a operação de prensagem a quente; o vapor pode ocasionar problemas de estouro e provocar a delaminação ao final do período de prensagem (MALONEY, 1993).

2.1.2.2. Geometria das partículas

A geometria das partículas influi indiretamente no acabamento, na cola-gem e na aplicação de produtos laminados nas superfícies das chapas. O tamanho e a forma das partículas determinam o comportamento da chapa quanto à absorção de água, estabilidade dimensional, resistência, aspereza da superfície e sua usinabilidade (SILVA, 2000). Segundo MALONEY (1977), a geometria das partículas tem efeitos importantes em todas as propriedades das chapas e pode influenciar outros processos básicos variáveis, como o equipamento usado nas outras etapas de manufatura.

A razão entre o comprimento e a espessura das partículas é denominada de razão de esbeltez, tendo grande influência nas características das chapas, como: área de contato entre as partículas na chapa, propriedades mecânicas e consumo relativo de resina. Para razões de esbeltez menores, utiliza-se maior quantidade de adesivo por unidade de área superficial das partículas, pois as superfícies laterais e as extremidades das partículas mais espessas representam uma porção significativa da área na qual o adesivo é aplicado, mas contribui muito pouco na ligação das partículas; entre as partículas mais espessas, o adesivo deve também absorver maiores esforços internos da chapa, exigindo-se maior quantidade de adesivo para proporcionar uma resistência adequada das ligações (SILVA, 2000).

MOSLEMI (1974) verificou que a produção de chapas, utilizando partículas longas e finas e empregando a mesma quantidade de adesivo, leva ao menor valor de ligação interna, quando comparadas às chapas feitas com partículas curtas e espessas. Fibras longas e finas, no entanto, produzem chapas com maior resistência à flexão e maior estabilidade dimensional. Para chapas com três camadas, as partículas superficiais devem apresentar uma razão de esbeltez entre 120 e 200; além disso, devem ser finas e longas, possuindo alto grau de flexibilidade, o que permite melhor contato entre as partículas quando elas são comprimidas. Para as partículas que compõem o miolo, a razão ideal de esbeltez deve estar em torno de 60.

IWAKIRI (1989), estudando o comportamento de chapas de partículas dos tipos *wafer*, *flaker* e *sliver*, produzidas a partir das madeiras de *Pinus serotina*, *Pinus palustris* e *Pinus glabra*, concluiu que as chapas do tipo

wafer apresentaram maior resistência à flexão, devido à maior razão de esbelte; entretanto as chapas do tipo *sliver* apresentaram maior ligação interna e maior absorção de água. Segundo o autor, a causa mais provável da maior absorção de água pelas chapas do tipo *sliver* se deve à maior área superficial específica das partículas e menor disponibilidade de resina por unidade de área, resultando em maior área de absorção e menor resistência à absorção oferecida pelas películas mais finas da linha de cola entre as partículas.

2.1.2.3. Umidade das partículas

O teor de umidade das partículas tem um efeito significativo no processo de produção de chapas e nas suas propriedades. Partículas muito úmidas produzem vapor no interior das chapas no momento de sua prensagem, levando à formação de *blisters* (bolhas) quando a pressão é aliviada; para tanto, os painéis com partículas muito úmidas requerem tempo mais longo de prensagem e interferem na qualidade de adesão. Por outro lado, partículas muito secas aumentam o perigo de incêndio no interior dos secadores, gerando maior quantidade de pó expelido das laterais da chapa durante a operação de prensagem, devido à deficiência de adesivo em suas superfícies.

O gradiente de umidade do colchão influi na transferência de calor ao longo de sua espessura; o tempo necessário para o aquecimento do miolo, por sua vez, diminui com o aumento do teor de umidade da superfície do colchão. A umidade excessiva interfere negativamente na cura do adesivo e reduz a resistência do painel à compressão, além de promover maior densificação das camadas superficiais.

MALONEY (1977) afirmou que, através de manipulações dos teores de umidade, é possível alterar as propriedades da chapa quando a prensa for aberta, fazendo com que o teor de umidade total do colchão possa ser mantido dentro de uma determinada faixa, sem a formação de bolhas.

Segundo a FAO (1959), as partículas devem apresentar o teor de umidade entre 3 e 8%, para que se permita aplicação do adesivo.

2.1.2.4. Adesivos

Segundo MALONEY (1989) e PIZZI e MITTAL (1994), os adesivos à base de fenol-formaldeído e de uréia-formaldeído são utilizados em 90% dos painéis à base de madeira, produzidos pelo processo seco, no mundo. A uréia-formaldeído (UF) é um adesivo para uso interno (sem contato com umidade), com boas propriedades de colagem, coloração clara, não é inflamável, cura tanto a frio (com catalisador ácido) como a quente e é o de mais baixo custo, atualmente. Pode ser, ainda, misturado com melamina, aumentando a resistência à umidade. As desvantagens são a baixa resistência à alta umidade e alta temperatura e a emissão de formaldeído, que acarreta graves problemas à saúde humana.

A quantidade e o tipo de resina são fatores extremamente importantes nas propriedades finais das chapas de partículas. Os níveis adequados de resina para a manufatura da chapa têm sido motivo da discussão entre vários pesquisadores. De acordo com VITAL (1980), quanto mais elevado a quantidade de adesivo melhor a qualidade final do painel elaborado.

WILSON e KRAHMER (1976) observaram que a eficiência do adesivo depende de suas propriedades, da forma de distribuição nas partículas de madeira, do tamanho da gotícula espalhada e de seu contato com partículas adjacentes e da quantidade aplicada.

Muitas investigações têm demonstrado que o teor e a distribuição do adesivo influenciam, significativamente, as propriedades físicas e mecânicas das chapas. Segundo CHOW (1976), os painéis com alto conteúdo de resina são mais rígidos e resistentes. KELLY (1977) verificou que o aumento de 10 para 15% em adesivo uréia-formaldeído acarretou uma pequena melhora nas propriedades de resistência e inchamento em espessura das chapas. LEHMANN (1970) observou que o aumento no teor de adesivo de 4 para 8% acarretou uma leve melhora no módulo de ruptura, módulo de elasticidade e inchamento na espessura das chapas, mas um aumento substancial na ligação interna. O mesmo foi observado por BRITO (1984), trabalhando com *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* e *Pinus patula*, onde foi verificada que houve uma melhora sensível nas propriedades mecânicas e inchamento em espessura ao aumentar o teor de resina de 4 para 8%.

Segundo SILVA (2000), para uma correta aplicação do adesivo devem ser considerados certos fatores, como o controle de quantidade do adesivo, que deve se concentrar na faixa de 5 a 10%, com base no peso seco das partículas, e a homogeneidade de distribuição do adesivo para assegurar uma uniformidade nas propriedades em toda a extensão do painel. Para VITAL (1980), qualquer fator que promova a cura completa do adesivo contribui para a melhora das propriedades do painel.

2.1.2.5. Aditivos

São produtos químicos incorporados ao adesivo, com a finalidade de melhorar algumas propriedades específicas das chapas. Os principais aditivos são:

Catalisador ou Endurecedor – é o produto químico utilizado para reativar a pré-condensação e ajudar na cura da resina. Para a cura da uréia-formaldeído são utilizados o cloreto de amônia e o sulfato de amônia.

Emulsão de Parafina – é o produto químico que é aplicado para redução da higroscopicidade das partículas de madeira e melhora da estabilidade dimensional das chapas, devendo ser usado na proporção de até 1% base peso seco das partículas; qualquer teor acima do indicado pode diminuir as propriedades de resistência das chapas e interferir na cura da resina.

Retardantes de Fogo – são produtos químicos incorporados no material durante o processo de produção ou através da impregnação em chapas após a prensagem, com a finalidade de retardar o efeito do fogo, em caso de incêndios. Os produtos mais utilizados são: fosfato de amônia, ácido bórico, sulfato de amônia e bromato de amônia.

Biocidas – são produtos químicos incorporados ao material durante o processo de produção, na proporção de 0,25 até 2,5%, com base no peso seco das partículas. Os produtos atualmente utilizados são derivados de boro e cobre (SILVA, 2000).

2.1.2.6. Prensagem

A prensagem é uma das fases mais importantes na fabricação de painéis à base de madeira, pois determina a espessura e a densidade final do painel e, ainda, transfere calor, que proporciona a cura do adesivo e a consolidação do painel.

Durante a prensagem, existem quatro fatores que interferem na qualidade final do painel: tempo de fechamento da prensa, tempo de prensagem, temperatura da prensa e pressão.

O tempo de fechamento da prensa é o tempo de compressão das partículas, desde o contato dos pratos da prensa com o material, até atingir a espessura desejada (MATOS, 1988).

Segundo KELLY (1977), o aquecimento das camadas superficiais ocorre rapidamente e permite a compressão das partículas antes do aquecimento da parte interna (miolo). Desse modo, não ocorre boa distribuição da compressão através do material, provocando um aumento no gradiente vertical de densidade. O autor relatou que um tempo muito longo de fechamento faz com que a resina nas partículas, em contato com os pratos aquecidos da prensa, polimerize antes que um contato suficiente entre as partículas tenha ocorrido; tal fato resulta na redução da adesão do material, causando a pré-cura nas camadas superficiais, o que reduz as propriedades de resistência.

O tempo de prensagem é o intervalo entre o momento em que o colchão é comprimido, atingindo a espessura final da chapa, até o momento de abertura dos pratos da prensa; é um dos parâmetros que determina o rendimento do processo produtivo e é muito importante na formação do gradiente vertical de densidade, que exerce grande influência nas propriedades da chapa (SILVA, 2000).

Segundo IWAKIRI (1989), o tempo mínimo de prensagem depende, principalmente, da eficiência na transferência de calor, da espessura do painel, da temperatura de prensagem e da distribuição da umidade no colchão. SILVA (2000) citou que o tempo de prensagem deve ser o suficiente para possibilitar a migração do excesso de água para as bordas da chapa até o término da prensagem.

Segundo MATOS (1988), as reduções no tempo de prensagem dos painéis são mais desejáveis, pois implicam maior produção por unidade de tempo, bem como provoca redução no consumo de energia. O autor relatou que o principal efeito do decréscimo no tempo de prensagem é a redução nas propriedades de resistência.

O tempo de prensagem pode variar de 4 a 8 minutos e depende de algumas variáveis, como: a) espessura da chapa (quanto maior a espessura da chapa, maior o tempo de prensagem); b) umidade do colchão (quanto maior a umidade do colchão, maior será o tempo de prensagem); e c) temperatura de prensagem (quanto maior a temperatura da prensagem, menor será o tempo de prensagem) (SILVA, 2000).

A principal função da temperatura da prensa na produção de painéis de partículas é a aceleração da polimerização do adesivo, distribuído entre as partículas e a plasticização da madeira (MATOS, 1988). A temperatura da prensa também promove a consolidação do colchão para a espessura e a densidade desejadas (SILVA, 2000).

HEEBINK et al. (1972) afirmaram que a maior temperatura de prensagem permite o fluxo mais rápido de calor e a melhor densificação das camadas mais internas da chapa, resultando em maior resistência das ligações internas e menor resistência à flexão estática.

Segundo SILVA (2000), a temperatura de prensagem recomendada quando se utiliza a uréia-formaldeído deve variar entre 140 e 160 °C, enquanto para as resinas fenólicas as temperaturas devem estar na faixa de 160 a 180 °C.

As principais funções da pressão aplicada sobre as partículas são a consolidação do colchão na espessura final desejada e o contato adequado entre as partículas (MENDES, 2001).

MOSLEMI (1974) afirmou que o maior teor de umidade do colchão permite maior facilidade na compressão das partículas, reduzindo a pressão necessária para a sua consolidação até a espessura final desejada, devido ao efeito da umidade sobre a plasticização da madeira. Segundo o autor, se a temperatura da prensa é muito alta a cura da resina é mais rápida, resultando em maior resistência do colchão à sua consolidação, necessitando de maior pressão para atingir a espessura final da chapa.

Segundo a FAO (1959), os painéis de média densidade apresentam uma variação de pressão de 14 a 35 kg/cm² e a pressão aplicada depende de vários fatores. SILVA (2000) afirmou que a pressão está relacionada com variáveis como: a) área de contato (quanto maior a área de contato entre as partículas, maior deverá ser a pressão aplicada); e b) densidade da chapa (quanto maior a densidade da chapa pretendida, maior deverá ser a pressão aplicada); a pressão exercida depende da espessura, da transferência do adesivo entre as superfícies das partículas e do tempo de fechamento da prensa.

2.2. Plásticos

A palavra plástico originou-se do grego *plastikós*, que significa “adequado à moldagem”. No mundo moderno, o plástico tem uma grande importância, pois substitui outros materiais que estão ficando caros.

Os primeiros relatos sobre o plástico apareceram por volta de 1835, com a apresentação do monômero de cloreto de vinil por REGNAULT (USP, 2004). A partir daí, foram feitas várias pesquisas. Atualmente, existem muitos tipos de resinas termoplásticas, que se diferenciam quanto ao tipo de estrutura química, processos de polimerização e catalisadores.

A matéria-prima do plástico é o petróleo, que é formado por uma complexa mistura de compostos com diferentes temperaturas de ebulição, sendo separáveis por destilação. A partir do seu processo de refino, obtém-se a nafta; através de um processo conhecido como craqueamento da nafta ocorre a produção de gases, como eteno e propeno (monômero). Esses gases passam por um processo de polimerização no qual podem ser utilizados diferentes processos e tipos de catalisadores para formação dos diversos tipos de resinas termoplásticas.

No final do processo de polimerização o plástico se apresenta com o aspecto de grânulos, que conterá, além da matriz molecular, impurezas ocasionais ou provenientes deste processo. Também podem ser utilizados aditivos como: plastificantes, cargas, corantes e pigmentos, estabilizantes, modificadores de impacto e lubrificantes, sendo estes os principais responsáveis pelas propriedades específicas, quer durante sua fabricação, quer no produto acabado.

Após o processo de produção, os grânulos de plásticos são enviados para as indústrias transformadoras através de algum tipo de processo, como: extrusão, injeção, sopro etc. A possibilidade de usar as diversas técnicas de polimerização, aliada aos diferentes tipos de catalisadores e às inúmeras formas de transformar o plástico, dota a matéria plástica de uma enorme flexibilidade.

O uso de materiais plásticos vem crescendo progressivamente, pois eles têm substituído com eficiência materiais tradicionais, como o alumínio, o gesso e a madeira, por apresentar vantagens como:

- menor consumo de energia na sua produção;
- redução do peso do lixo orgânico coletado;
- menor custo de coleta e destino final; e
- praticidade e possibilidade de serem totalmente recicláveis.

2.3. Resinas termoplásticas

2.3.1. Polipropileno (PP)

O polipropileno é um dos mais recentes termoplásticos, desenvolvido por volta de 1954, através da polimerização do monômero do propileno ou propeno, à baixa pressão e temperatura, usando-se catalisadores de Ziegler – Natta.

É um termoplástico branco e opaco, com cristalinidade em torno de 60 a 70%. Possui um equilíbrio entre resistência ao impacto e à rigidez e resistência à distorção em altas temperaturas. Suas propriedades mecânicas dependem do peso molecular e da sua distribuição, da estereorregularidade da cadeia e das condições de processo. Possui excelente resistência ao ataque químico por ácidos, álcalis e sais. Mesmo em elevadas temperaturas reage com o cloro e o permanganato de potássio; sofre oxidação facilmente, se exposto ao ar a altas temperaturas; não é solúvel em hidrocarbonetos simples e hidrocarbonetos clorados à temperatura ambiente, mas é bastante solúvel à temperatura superior a 80 °C; não é tóxico e é um sólido combustível, porém gera gases irritantes na queima.

No Quadro 1 estão algumas das propriedades do polipropileno.

Quadro 1 – Propriedades do polipropileno

Propriedades	
Peso Molecular	80.0000 – 500.000
Densidade	0,90 – 0,91
Índice de Fluidez a 190 °C (ASTM D 1238 ^a)	0,50 - 45
Índice de Refração	1,49
Temperatura de Transição Vítreia °C	4 – 12
Temperatura de Fusão °C	165 – 170
Temperatura de Amolecimento °C	150
Tensão de Ruptura N/mm ² (BS.2782, Pt.3)	30 – 35
Elongação% (BS.2782, Pt.3)	50 – 600
Resistência ao Impacto (Izod) J	1 – 10
Dureza	71 – 75
Constante Dielétrica	2,0 – 2,15

Mais da metade da produção do polipropileno no mundo é destinada à fabricação de componentes para automóveis, utensílios domésticos e carpetes. Existem segmentos, no entanto, com altas taxas de crescimento no consumo de polipropileno. Essa alta taxa de crescimento é praticamente estrutural, devido à relativa baixa penetração em muitas aplicações já tecnicamente comprovadas (embalagens e moldagem industrial por sopro) ou nascentes (fios, não-tecidos, filmes industriais e construção civil).

O setor de embalagens é um grande segmento no consumo do polipropileno; não é vulnerável aos períodos de recessão, mas é bastante influenciado pela legislação sobre reciclagem. Dependendo das propriedades necessárias para uma embalagem específica, o polipropileno pode competir com outros termoplásticos, como polietileno, PVC ou poliestireno. O aumento da rigidez em alguns tipos de polipropileno possibilitou o seu uso em situações em que o brilho não é importante.

Em termos ambientais, o polipropileno tem bastante aceitação, pois é reciclável e fácil de incinerar. Se a legislação no futuro exigir a reciclagem total dos automóveis, o polipropileno aumentará ainda mais o seu uso nesse segmento.

2.3.2. Polietileno (PE)

O polietileno foi descoberto, em 1899, pelo químico alemão Hans Pechmann, passando a ser produzido industrialmente em 1939. Ele possui uma das mais simples estruturas de todos os polímeros e pode ser reproduzido através de vários processos, que lhe conferem características próprias de densidade, peso molecular e distribuição de peso molecular.

Há quatro tipos básicos de polietileno:

Polietileno de baixa densidade (PEBD): É obtido pelo processo de alta pressão no reator, com densidade variando entre 0,910 e 0,925 g/cm³; apresenta moléculas com alto grau de ramificação e é um material flexível, de boa dureza, elevada resistência química, boas propriedades elétricas, facilmente processável, atóxico e inerte. É utilizado em filmes, laminados, recipientes, embalagens, brinquedos, isolamento de fios elétricos etc.

Polietileno de baixa densidade linear (PEBDL): É obtido pelo processo de alta pressão no reator, com densidade variando entre 0,918 e 0,940 g/cm³; apresenta menor incidência de ramificações, que têm forma regular e são mais curtas que no PEBD. Suas propriedades mecânicas são ligeiramente superiores às do PEBD, em termos de resistência mecânica; possui maior brilho, maior rigidez e menor permeabilidade a gases para uma mesma densidade que o PEBD; e seu custo de fabricação é menor. Devido à sua flexibilidade e resistência ao impacto, é recomendada a sua aplicação para embalagens de alimentos, bolsas de gelo, utensílios domésticos, canos e tubos.

Polietileno de alta densidade (PEAD): É obtido pelo processo de baixa pressão no reator, com densidade variando entre 0,935 e 0,960 g/cm³; apresenta estrutura praticamente isenta de ramificações. É um plástico rígido, resistente à tração, com moderada resistência ao impacto. Este é utilizado em bombonas, recipientes, garrafas, filmes, brinquedos, materiais hospitalares, tubos para distribuição de água e gás, tanques de combustível automotivos etc.

Polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM): Possui um grau de polimerização variando entre 3.000.000 e 6.000.000, alta inércia química, alta resistência à abrasão e ao impacto, baixo coeficiente de atrito e alta maciez. Praticamente, ele é infusível, processado com grande dificuldade,

geralmente através de sinterização. É utilizado em componentes para bombas de líquidos corrosivos, implantes de ossos artificiais, isolamento de fios e cabos, mancais, revestimento de pistas, trilhos-guias etc.

No Quadro 2 estão as características, as propriedades e os usos dos principais termoplásticos.

Quadro 2 – Características, propriedades e usos dos principais termoplásticos

Termo-plásticos	Densidade (g/cm ³)	Temp. de Transição Vítre (Tg)	Temp. de Fusão °C (Tm)	Resist. à Tração (kgf/cm ²)	Elongação (%)	Descrição
1 – PET 	1,37 a 1,38	78	250 a 270	40	20 a 600	Poliétileno Tereftalato – usado em garrafas para refrigerantes, fibras sintéticas e outros.
2 – PEAD 	0,94 a 0,98	-100 a 125	130 a 135	152 a 786	12 a 700	Poliétileno de alta densidade – engarrafados de bebidas, baldes, garrafas para álcool, garrafas para produtos químicos domésticos, bombonas, tambores, tubos e filmes.
3 – PVC 	1,35 a 1,45	81	273	680	4 a 5	Policloreto de vinila – tubos e conexões para água, conduítes, garrafas para água mineral e detergentes líquidos, lonas e calçados.
4 – PEBD 	0,91 a 0,94	-20 a -30	109 a 125	179 a 331	150 a 600	Poliétileno de baixa densidade – embalagens de alimentos, sacos industriais, sacos para lixo, filmes para plasticultura e filmes em geral.
5 – PP 	0,90 – 0,91	4 a 12	165 a 175	30 a 350	50 a 600	Polipropileno – embalagens para massas e biscoitos, potes para margarina, seringas descartáveis, fibras e fios têxteis, utilidades domésticas e autopeças.
6 – PS 	1,05 a 1,07	100	235	280 a 530	1 a 2	Poliestireno – cabine de aparelhos de TV e som, copos descartáveis para água e café, embalagens alimentícias e embalagens em geral.



Símbolo utilizado para identificar outras resinas plásticas.

2.4. Reciclagem do plástico

A reciclagem envolve uma questão social e o problema do acúmulo de lixo, e o esgotamento dos recursos naturais afeta toda a sociedade. A viabilidade econômica de projetos de reciclagem depende não apenas do investimento

em novas tecnologias, mas também da contribuição individual de toda a população. A realização de programas de educação ambiental, no âmbito de instituições ou através de campanhas governamentais, é a melhor forma de conscientização da população que almeja a melhoria da qualidade de vida.

O acúmulo de lixo urbano é um problema da maioria das cidades brasileiras. Além da escassez de locais apropriados para receber resíduos sólidos, o lixo causa graves danos à saúde. Dentre os vários tipos de aproveitamento de resíduos sólidos, a reciclagem, ou seja, o retorno ao consumo dos materiais que ainda possuem algum valor agregado, é o mais indicado (VILHENA, 1993).

De modo geral, pode-se classificar a reciclagem de plásticos em três tipos de tecnologias: primária, secundária e terciária.

Reciclagem primária ou pré-consumo: é a conversão de resíduos plásticos através de tecnologias convencionais de processamento em produtos com características de desempenho equivalentes às daqueles produtos fabricados a partir de resinas virgens. Esses resíduos são constituídos por artefatos defeituosos, aparas provenientes dos moldes ou dos setores de corte e usinagem. A recuperação desses resíduos é efetuada na própria indústria geradora ou por outras empresas transformadoras. A reciclagem pré-consumo é feita com os materiais termoplásticos provenientes de resíduos industriais, que são limpos e de fácil identificação e não são contaminados por partículas estranhas. O reaproveitamento desse material é realizado na própria indústria geradora dos resíduos ou por outros transformadores. Pode-se afirmar que praticamente 100% destes resíduos são reciclados e que a qualidade dos artefatos produzidos com esse material é essencialmente a mesma daquela obtida com a utilização de resinas virgens.

Reciclagem secundária ou pós-consumo: é a conversão de plásticos do lixo, por um processo ou por uma combinação de operações, em produtos com requisitos de desempenho inferiores aos do material original. Os materiais que se inserem nessa classe provêm de lixões, sistemas de coleta seletiva, sucatas etc. São constituídos pelos mais diferentes tipos de material e resina, o que exige uma boa separação, para serem aproveitados. Quando se fala em reciclagem de plásticos do lixo, refere-se à reciclagem pós-consumo. Devido à mistura com outros materiais, como restos de alimentos, terra, trapos, metais, vidros, papel etc., torna-se necessária a separação desses materiais da melhor

forma possível. O problema é minimizado quando se aplica um sistema de coleta seletiva, através da separação dos diversos tipos de materiais nas próprias residências e empresas comerciais, evitando-se, desta forma, a sua contaminação.

Reciclagem terciária: é a conversão de resíduos plásticos em produtos químicos e combustíveis, através de processos termoquímicos (pirólise e conversão catalítica). Por meio desses processos, os materiais plásticos são convertidos em matérias-primas que novamente podem originar as resinas virgens ou outras substâncias interessantes para a indústria, como gases e óleos combustíveis. A reciclagem terciária ainda não está sendo utilizada em grande escala, devido ao custo elevado.

Os termoplásticos são recicláveis e, de acordo com sua estrutura molecular, apresentam características próprias. Assim, fundem-se em diferentes temperaturas, sendo muitas vezes incompatíveis entre si e adequados às diferentes aplicações. Os resíduos plásticos podem ser separados do lixo através da coleta seletiva, da separação manual, ou através da diferença de densidade: i) na coleta seletiva, a própria população inicia a separação dos diversos materiais; ii) na separação manual, catadores treinados separam os diferentes polímeros, após o recolhimento do lixo; e iii) na separação por densidade, é preciso levar os resíduos plásticos a um tanque da unidade recicladora, contendo soluções hidro-alcoólicas, aquosas ou salinas. A coleta seletiva é a alternativa mais econômica para a reciclagem dos diferentes plásticos (WASSERMANN, 2002).

O Brasil ainda consome pouco plástico, quando comparado aos países mais desenvolvidos (Quadros 3 e 4). É de se supor, portanto, que a demanda aumentará muito nos próximos anos, e se não houver bom planejamento para o perfeito gerenciamento dos resíduos plásticos as conseqüências serão semelhantes àquelas já vividas por alguns países envolvidos com volumes enormes de lixo. As instalações de incineradores nem sempre são aprovadas pela população local e os custos financeiros e políticos tornam-se incompatíveis com a realidade dessas regiões.

Quadro 3 – Consumo *per capita* de plásticos em alguns países em 1998 (kg/hab.ano)

País	Consumo
Estados Unidos	70
Japão	55
Europa Ocidental	50
Brasil	21

Quadro 4 – Consumo estimado nacional (t/ano)

	1992	1994	1996	1998	1999	2000	2001	2002
PEBD	430.387	459.098	479.626	488.616	545.887	581.386	560.583	527.711
PEBDL	20.991	109.650	148.809	196.474	270.509	312.575	317.306	339.191
PEAD	210.023	370.468	511.658	637.476	641.989	700.393	676.187	690.176
PP	283.393	417.047	560.405	612.138	708.993	777.496	817.531	909.559
PS	111.238	175.568	240.208	267.457	257.174	294.636	288.404	305.917
PVC	329.408	454.444	575.638	717.873	661.643	731.144	620.498	688.841
EVA	24.779	31.996	33.041	30.181	37.717	50.566	46.793	43.837
PET	19.426	93.433	180.518	383.213	407.753	418.930	482.403	423.493
Total	1.429.645	2.111.704	2.729.903	3.333.428	3.531.665	3.867.126	3.809.705	3.928.725

Fontes: ABIQUIM, Relatórios trimestrais do SDI, Anuário da Indústria Química Brasileira, no caso de PET, IBGE e Banco Central do Brasil.

PEBD = polietileno de baixa densidade; PEBDL = polietileno de baixa densidade linear; PEAD = polietileno de alta densidade; PP = polipropileno; PS = poliestireno; PVC = policloreto de vinila; EVA = copolímero de etileno-acetato de vinila; e PET = polietileno tereftalato.

A reciclagem dos materiais plásticos encontrados no lixo urbano traz alguns benefícios sociais e econômicos para a sociedade, dentre os quais podem ser destacados:

- Redução do volume de lixo coletado que é removido para os aterros sanitários, propiciando-lhe aumento da vida útil e redução dos custos de transporte.
- Economia de energia e petróleo, pois os plásticos são derivados de petróleo e 1 kg de plástico equivale a 1 L de petróleo, em energia.
- Geração de empregos (catadores, sucateiros, operários etc.), com redução da pressão social.
- Menor preço para o consumidor dos artefatos produzidos com plástico reciclado (em média, os artefatos produzidos com plástico reciclado são 30%

mais baratos do que os mesmos produtos fabricados com matéria-prima virgem).

- Melhoria sensível no processo de decomposição da matéria orgânica nos aterros sanitários, uma vez que o plástico impermeabiliza as camadas de material em decomposição, prejudicando a circulação de gases e líquidos.
- Contribuição para redução da degradação ambiental como um todo.

É importante ressaltar que, internacionalmente, estão sendo feitos esforços que visam promover e facilitar a atividade de reciclagem. Cada país tem sua legislação própria, sendo alguns mais rigorosos e seletivos que outros. Alguns países limitam o uso de material reciclado a certas aplicações, como no caso dos produtos alimentícios, produtos medicinais etc.

2.5. Compósitos

2.5.1. Materiais compósitos

Muitas tecnologias modernas exigem materiais com combinações incomuns de propriedades, que não podem ser atendidas por ligas metálicas, cerâmicas, madeira e materiais poliméricos convencionais. Os compósitos têm surgido como uma valiosa classe de materiais de engenharia, porque oferecem muitos atributos não conseguidos com outros materiais ou são mais viáveis economicamente do que os materiais concorrentes.

Há várias definições para o termo compósito; de modo geral, os materiais compósitos podem ser definidos como materiais formados de dois ou mais constituintes, com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface. Os compósitos são importantes por permitir a combinação de materiais distintos, podendo inclusive ser superiores, em alguns aspectos, às propriedades dos seus componentes individuais.

Com os materiais compósitos é possível obter produtos com diferentes propriedades, como leveza, ductilidade, resistência a altas temperaturas, dureza e resistência ao choque.

Devido aos bons resultados obtidos através da produção de certos materiais compósitos, como a fibra de carbono, atualmente estão se intensificando as pesquisas, visando a obtenção de novos produtos. A formação de painéis

de compósito plástico/madeira vem sendo pesquisada, e esta pode ser uma boa opção para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

WIGOTSKY (1988) relatou que os produtos obtidos pela mistura desses constituintes começaram a ser comercialmente empregados na década de 1980, principalmente no Japão e nos Estados Unidos, sendo fabricados segundo os mais diversos perfis e utilizados para as mais variadas aplicações.

2.5.2. Compósito plástico/madeira

O termo “compósitos plástico/madeira” se refere a alguns materiais que contêm madeira de alguma forma e materiais termorrígidos ou termoplásticos.

Os compósitos termorrígidos/madeira datam de antes de 1900. Um compósito comercial anterior, introduzido no mercado sob o nome comercial de baquelite, era composto de fenol-formaldeído e partículas de madeira. O primeiro anúncio do seu uso comercial foi em 1916, no câmbio de marchas de um Rolls Royce (Gordon 1988, citado por CLEMONS, 2002).

Os compósitos termoplástico/madeira têm sido fabricados nos Estados Unidos há várias décadas, e a indústria experimentou um crescimento fantástico nos últimos anos (CLEMONS, 2002).

A indústria de plásticos tem tradicionalmente usado talco, carbonato de cálcio, mica, vidro ou fibras de carbono como enchimento e reforços para modificar o desempenho dos plásticos. O uso de fibras de madeira apresenta certas vantagens, por serem elas renováveis, mais baratas e menos abrasivas aos equipamentos no processamento, quando comparadas com os enchimentos convencionais.

Inicialmente, essa indústria estava relutante em usar madeira ou outras fibras naturais, pois a maioria dos processadores de plásticos não conhece as fibras de madeira, por causa de sua baixa densidade, baixa estabilidade térmica e tendência de absorver umidade. Os processadores de plástico enfrentam um problema por não saber como medir e forçar, de forma consistente, as fibras de madeira de baixa densidade dentro dos pequenos orifícios típicos dos sistemas de alimentação dos equipamentos. Além disso, a temperatura de processamento para equilibrar o baixo ponto de fusão dos plásticos é também freqüentemente elevada quando se incorporam fibras de madeira, o

que pode levar a outro problema, que é a degradação térmica das fibras de madeira.

O elevado teor de umidade da madeira e de outras fibras naturais é também problemático à indústria dos plásticos, que considera alto o índice de umidade de aproximadamente 1 a 2%. Mesmo os processadores de plástico com equipamentos ventilados, capazes de remover a umidade durante o processamento, rejeitaram a remoção de umidade das fibras de madeira. Os secadores da resina necessários para secar os plásticos não são apropriados para as partículas ou as fibras de madeira. Secar as partículas de madeira finas pode provocar incêndio.

Outro fator importante que influencia o processamento e as propriedades dos compósitos fabricados é o tamanho das partículas de madeira. O Quadro 5 ilustra a importância do tipo de partícula de madeira e, principalmente, a influência positiva dos agentes de ligação em todas as principais propriedades avaliadas na produção de compósitos.

Quadro 5 – Propriedades mecânicas dos compósitos de plástico – polipropileno

Constituintes	Densidade (g/cm ³)	Tração			Flexão		Energia de Impacto Izod		Temperatura de deflexão ao calor (°C)
		Resistência (MPa)	Módulos (Gpa)	Elongação (%)	Resistência (MPa)	Módulo (GPa)	No Chamfro (J/m)	Fora do Chamfro (J/m)	
Polipropileno	0,9	28,5	1,53	5,9	38,3	1,19	20,9	656	57
PP + 40% de farinha de madeira	1,05	25,4	3,87	1,9	44,2	3,03	22,2	73	89
PP + 40% de fibras curtas	1,03	28,2	4,20	2,0	47,9	3,25	26,2	91	100
PP + 40% de fibras curtas + 3% de agente de ligação	1,03	52,3	4,23	3,2	72,4	3,22	21,6	162	105

Fonte: adaptado de FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

Atualmente, novas pesquisas estão sendo desenvolvidas, visando aderir o plástico a partículas maiores de madeira, como resíduos oriundos de fábricas de madeira e partículas das indústrias de painéis, através do método de termocompressão.

BRITO (2001) produziu painéis por termocompressão, usando uma mistura de polietileno de baixa densidade (PEBD) e resina à base de melamina-formol, em diferentes concentrações, e concluiu que a maior porcentagem da resina teve influência direta na melhora dos testes físicos e mecânicos dos painéis; a adição do polietileno de baixa densidade (PEBD) contribuiu para a melhora dos testes físicos dos painéis; para o teste de resistência à flexão os resultados foram piores, já para o teste de ligação interna o polietileno não influenciou os resultados.

MACIEL (2001) produziu painéis de baixa densidade, usando uma mistura de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus elliottii* Engelm com partículas de poliestireno (PS) e politereftalato (PET), utilizando como agentes de ligação adesivos de uréia-formaldeído, fenol-formaldeído e solução de poliestireno em tolueno. O autor concluiu que o emprego da solução de poliestireno em tolueno foi responsável pela melhora das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

TEIXEIRA e MOREIRA (2002) produziram painéis, utilizando resíduos de madeira de *E. grandis* na forma de cavacos, em união com polietileno de baixa densidade (PEBD), nas proporções de 60/40%, 50/50% e 40/60% de madeira/ plástico, e concluíram que os painéis apresentaram bons resultados para os testes de inchamento em espessura e dureza Janka; para o teste de absorção de água por 2 e 24 horas, apenas os tratamentos que envolviam a maior porcentagem de plástico apresentaram bons resultados. Já para os testes de resistência à flexão, os resultados não foram bons. Os autores concluíram que os painéis fabricados são promissores para fabricação de pisos e que o processo de termocompressão utilizado na fabricação dos painéis não deve ser comparado com outros processos, como injeção e extrusão, onde ocorre maior homogeneização do material, quando o plástico é derretido.

2.5.3. Adesão plástico/madeira

Um dos desafios a ser superado na produção de compósito plástico/madeira é melhorar a adesão entre os materiais; a mistura de resinas termoplásticas ou termofixas com farinha, fibras e partículas de madeira gera

sistemas onde pouca ou nenhuma adesão interfacial é desenvolvida, devido à incompatibilidade inerente entre os componentes.

Segundo KRISHNAN e NARAYAN (1992), para obter boa adesão interfacial entre os constituintes, torna-se necessária a aplicação de três mecanismos: modificação superficial das biofibras, uso de agentes de acoplamentos interfaciais e modificação da estrutura do plástico.

A modificação de fibras celulósicas envolve a introdução de grupos funcionais ou revestimento das fibras com aditivos que possuem grupos funcionais adequados, de forma a tornar a superfície da fibra menos hidrofílica, aumentando a probabilidade de interação com os polímeros hidrofóbicos (KRISHNAN e NARAYAN, 1992).

Os agentes de acoplamento são substâncias muito importantes na fabricação de compósitos termoplásticos por melhorarem a adesão entre as superfícies hidrofílicas da madeira e hidrofóbicas dos polímeros termoplásticos, gerando produtos com melhores propriedades mecânicas.

Segundo MACIEL (2001), os agentes de acoplamento são classificados em orgânicos, inorgânicos e orgânicos/inorgânicos. Os agentes orgânicos incluem os isocianatos, anidridos, amidas, imidas, acrilatos, epóxidos e ácidos orgânicos. Algumas resinas termofixas, como fenol-formaldeído (PF) e mono ou dimetilolmelamina (DMM), também têm sido utilizadas como agentes de ligação. Estas resinas formam ligações cruzadas entre seus grupos metilênicos (-CH₂-) e os grupos metilol (-CH₂OH) e hidroxil (-OH) disponíveis nos constituintes químicos das fibras de madeira, melhorando a adesão interfacial com a matriz de plástico. Os agentes orgânicos possuem, normalmente, em suas estruturas grupos bi- ou multifuncionais que interagem com os grupos polares da celulose e lignina para formar ligações co-valentes ou ligações de hidrogênio. Podem também modificar a matriz polimérica pela copolimerização grafitada, levando a uma resistente adesão, devido ao equilíbrio de ligações que promovem nas interfaces. O silicato de sódio é um dos poucos agentes inorgânicos utilizados na produção de compósitos termoplásticos. Os agentes inorgânicos possibilitam a ação dispersante e, com isso, a neutralização da polaridade superficial das fibras de madeira, melhorando, assim, a compatibilidade entre a fibra e o plástico.

A grafitação é um exemplo claro da modificação na estrutura do plástico, pois esta consiste em introduzir outros monômeros de caráter não-polar ou polar na cadeia do polímero, gerando um copolímero que terá sítios compatíveis com ambas as superfícies, hidrofóbica do plástico e hidrofílica da madeira, resultando em melhor adesão interfacial. Alguns métodos de grafitação de polímeros consistem nos processos de xantação, radiação, malateação e copolimerização por metacrilatos (MACIEL, 2001).

KRZYSIK et al. (1991), em um estudo sobre compósitos formados por fibras de madeira (70-85%) e fibras de polipropileno (15-30%), afirmaram que o tratamento das fibras de madeira com uma emulsão de polipropileno maleatado (PPMA) a 1% aumentou, significativamente, a resistência à tração e flexão. Não houve, no entanto, melhoria adicional dessas propriedades quando o teor de PPMA foi aumentado de 1 para 3%. Além de proporcionar menor absorção de água, o tratamento das fibras de madeira com PPMA permitiu incorporação eficiente do material na interface madeira/PP, formando um compósito reforçado.

KARMAKER e YOUNGQUIST (1996) avaliaram a resistência à flexão estática de compósitos de matriz de polipropileno, reforçado com fibras de juta (50%), produzidos com ou sem PPMA, como agente compatibilizador (3%). A adição de 50% de biofibras, como reforço, elevou o valor de resistência de 31,33 Mpa, no PP virgem, para 49,97 Mpa, porém a adição de 3% de PPMA elevou este valor de 31,33 Mpa para 87,66 Mpa.

COUTINHO et al. (1998) prepararam compósitos de polipropileno com fibras de madeiras modificadas com silanos e PPMA, empregando temperaturas de 170, 180 e 190 °C. As fibras foram tratadas pela reação de polimerização com o polipropileno ou pela imersão em orto-diclorobenzeno ou pela mistura em uma solução de PPMA e foi avaliada a adesão entre a matriz e as fibras de madeira; os autores concluíram que os melhores resultados foram obtidos com o uso de silano na presença ou não de PPMA, em temperatura de 180 °C.

GONZALES et al. (1992) afirmaram que embora o uso de PPMA em compósitos termoplásticos, em geral, acarrete melhora nas suas propriedades mecânicas, é possível que esse copolímero contribua apenas para melhorar a dispersão das fibras de madeira na matriz termoplástica. Os autores

verificaram que o uso de PPMA emulsificado, em compósitos à base do PP e PE, atua apenas como dispersante de fibras de celulose.

2.5.4. Produção de compósito plástico/madeira

A produção dos compósitos termoplásticos envolve a definição de certas variáveis como a escolha das matérias-primas, a sua mistura em dosagens adequadas e a escolha das técnicas de produção.

Na Figura 1 está o fluxograma de um possível ciclo produtivo desses produtos, em escala experimental.

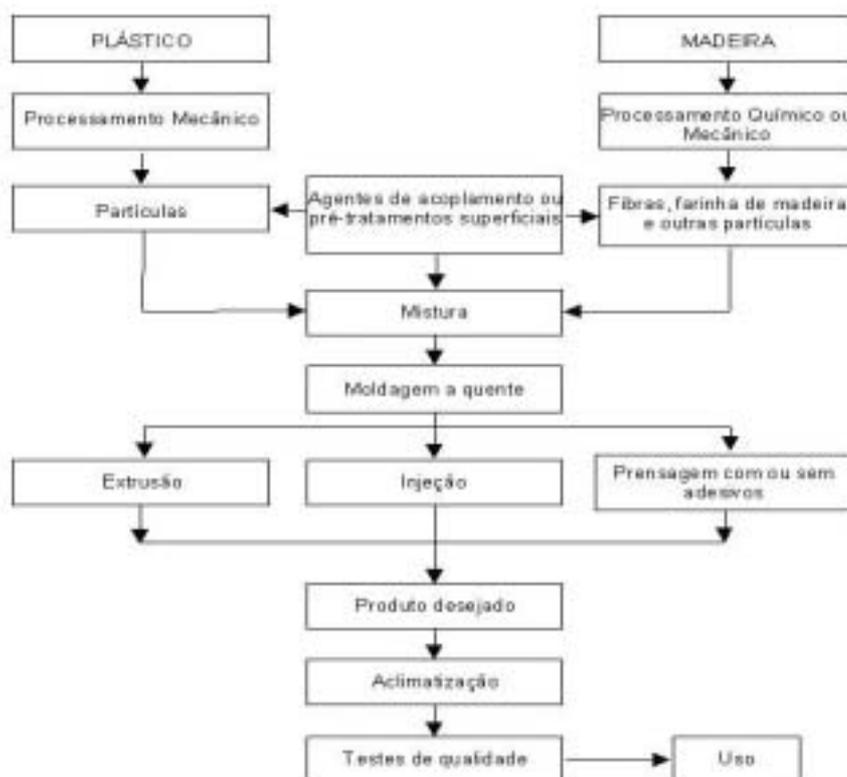


Figura 1 – Fluxograma da fabricação dos compósitos termoplásticos.

A fabricação de produtos à base de plástico e madeira, de matriz contínua ou descontínua, inicia-se com a transformação das matérias-primas empregadas, por processos químicos ou mecânicos para partículas, nas formas desejadas. A partir daí, tanto as partículas de madeira quanto as de plástico podem receber, diretamente, os agentes de acoplamento para formar a mistura desejada ou ter suas superfícies tratadas com agentes de acoplamento

específicos, de tal forma a favorecer a adesão entre os materiais incompatíveis. A seguir, a mistura pode tomar três vias distintas: molde a quente, através dos métodos de extrusão e injeção, ou então pode ser prensada pelo método de termocompressão, podendo-se utilizar adesivo ou não. O produto final passa por um período de climatização e, em seguida, é feito um teste de qualidade; se as suas propriedades forem boas, ele está pronto para ser usado.

Os compósitos termoplástico/madeira são utilizados nas partes externas de casas e, recentemente, estão também sendo usados em partes interiores de residências. Telhados de casa sujeitos ao fogo estão sendo produzidos a partir de fibras naturais recicladas e polietileno (CLEMONS, 2002).

3. MATERIAL E MÉTODOS

As partículas de madeira *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, empregadas neste experimento, foram doadas pela EUCATEX-SP e tinham comprimento variando de 0,5 a 16 mm e espessura de 0,3 a 1,2 mm. As resinas termoplásticas, polipropileno (PP) e polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), foram obtidas de plásticos reciclados comercialmente.

A Figura 2 mostra os tipos de partículas utilizadas na confecção dos painéis.



Figura 2 – Tipos de partículas empregadas na confecção dos painéis.

Teve-se como meta fabricar todos os painéis com uma densidade igual a $0,73\text{g/cm}^3$ e espessura de 1cm. As frações de madeira e plástico foram calculadas em função desses parâmetros. Para o cálculo da massa de madeira, foi considerado um teor de umidade de 3%. Foram utilizados os adesivos de uréia-formaldeído (CASCAMITE PB - 3110), uréia-formaldeído (CASCAMITE PB - 3110) + 0,5% epóxi (Araldite) e fenol-formaldeído (CASCOPHEN HL - 2080). Os adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído continham 64 e 46% de sólidos resinosos, respectivamente, e foram doados pela ALBA QUÍMICA S.A. A porcentagem da resina epóxi foi calculada com base na quantidade final de sólidos do adesivo. O catalisador usado para o adesivo de uréia-formaldeído foi o sulfato de amônia $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, em solução de 20%, na proporção de 1,5% em relação ao teor de sólidos do adesivo utilizado. A quantidade de adesivos aplicada nos painéis foi de 8% de sólidos resinosos, com base na massa da mistura empregada. Para todos os tratamentos, foi aplicado 0,5% de parafina. A porcentagem de parafina foi calculada com base apenas na quantidade final de madeira empregada em cada tratamento.

Para fabricação dos painéis, foram pesadas massas suficientes de madeira e plástico, colocadas no interior de um misturador tipo tambor rotatório com 1,2 m de diâmetro e 0,5 m de largura, que gira a uma velocidade de 26 rotações por minuto.

A parafina e o adesivo foram aplicados de forma homogênea por meio de um bico injetor acionado por compressor de ar, durante um tempo médio de 8 minutos para o adesivo de uréia-formaldeído e 15 minutos para o adesivo de fenol-formaldeído.

As partículas pulverizadas com a parafina e o adesivo foram pesadas para cada repetição e levadas à caixa formadora. Os colchões foram formados manualmente, depositando-se a mistura de partículas sobre uma chapa de alumínio de 40 x 40 cm, colocada sob a seção formadora com dimensões internas de 40 x 40 cm, onde as partículas foram distribuídas uniformemente.

O colchão foi prensado, empregando-se uma pressão de 32 kgf/cm^2 e temperatura de prensagem de $190\text{ }^\circ\text{C}$, durante 6 minutos.

Em seguida, os painéis foram acondicionados à temperatura ambiente, até atingir o equilíbrio. Após essa etapa, os painéis ganharam dimensões de

36 x 36 x 1 cm de espessura, e suas superfícies foram lixadas. Os corpos-de-prova para os testes mecânicos e físicos foram retirados dos painéis, de acordo com o esquema mostrado na Figura 3.

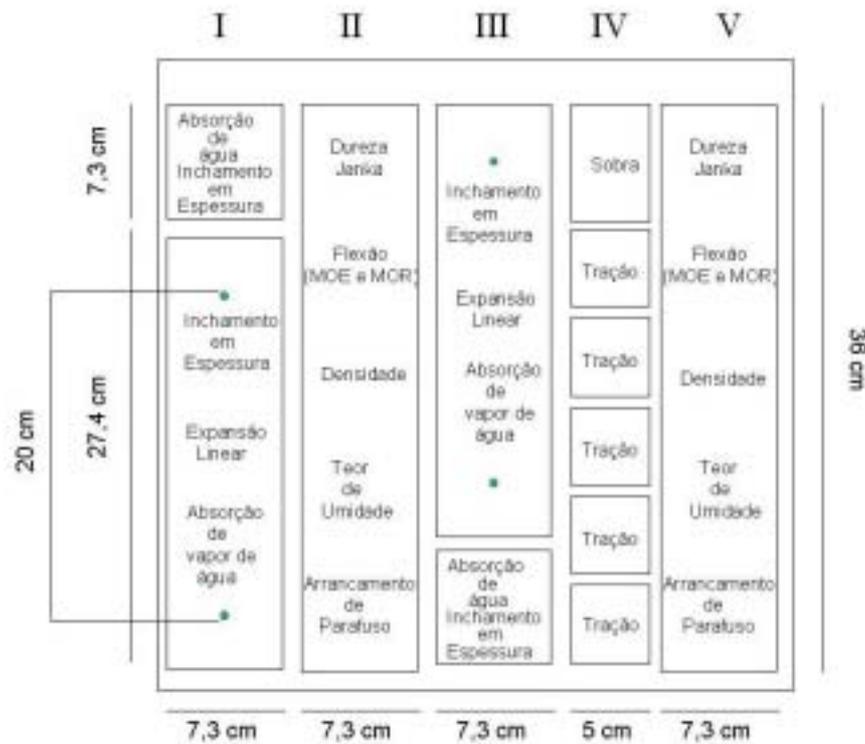


Figura 3 – Posições nas chapas para retirada dos corpos-de-prova.

O teor de umidade foi determinado em base seca, através do processo de secagem em estufa, com ventilação de ar forçada a 100 ± 3 °C, até peso constante. Os corpos-de-prova foram climatizados até equilíbrio em temperatura de 20 ± 3 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa em uma câmara climática.

Após a climatização, os corpos-de-prova foram testados de acordo com a norma americana ASTM-D 1037(1991). Foram feitas certas adaptações à norma, como diminuir a espessura dos corpos-de-prova de 2,5 cm para 2 cm nos testes de arrancamento de parafuso e dureza Janka, e diminuir o tamanho dos corpos-de-prova de 15,2 x 15,2 para 7,3 x 7,3 no teste de absorção de água. Os testes mecânicos foram realizados em máquina universal de ensaio CONTENCO de 10 toneladas.

Os valores médios observados para os testes mecânicos foram comparados com os valores mínimos exigidos pela norma comercial ANSI/A – 208.1-1993. Para os testes de absorção de água e inchamento em espessura, os valores médios foram comparados com as normas CSA 0437-93 e DIN 68 761 (1) – 1961, respectivamente. Os valores estabelecidos por essas normas podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 – Propriedades requeridas para chapas de partículas

Classifi- cação	Inchamento em Espessura			Expansão Linear (%)	Absorção em Água Tolerância (%)		Flexão Estática		Ligação Interna (kgf/cm ²)	Dureza Janka (kgf/cm ²)	Arrancamento de Parafuso (kgf)	
	Tolerância média do painel (%)				2 h	24 h	MOE (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)			Face	Borda
	Amb.	2 h	24h									
H – 1	NE	NE	NE	NE	NE	NE	24.000	165	9	222,5	180	132,5
H - 2	NE	NE	NE	NE	NE	NE	24.000	205	9	445,0	190	155,0
H – 3	NE	NE	NE	NE	NE	NE	27.500	235	10	667,5	200	155,0
M – 1	NE	NE	NE	0,35	NE	NE	17.250	110	4	222,5	NE	NE
M – S	NE	NE	NE	0,35	NE	NE	19.000	125	4	222,5	90	80
M – 2	NE	6*	15*	0,35	10**	15**	22.500	145	4,5	222,5	100	90
M – 3	NE	NE	NE	0,35	NE	NE	27.500	165	5,5	222,5	110	100
LD – 1	NE	6	15	0,35	10	15	5.500	30	1,0	NE	40	NE
LD – 2	NE	NE	NE	0,35	NE	NE	10.250	50	1,5	NE	55	NE

H – alta densidade (superior a 800 kg/m³); M – média densidade (640 – 800 kg/m³); MS – densidade média especial (propriedades físicas entre M-1 e M-2); LD – baixa densidade (menor que 640 kg/m³); e NE – não-especificado.

* Norma DIN 68m761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981) e ** norma CSA 0437-1993.

Fonte: adaptado de ANSI/A 208.1 – 1993 *Wood Particleboard*.

4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado, seguindo um fatorial completo, com sete tipos de composição das partículas, três tipos de adesivos e duas repetições, totalizando 42 painéis. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

A seguir, estão listadas as combinações empregadas para confecção dos painéis de partículas de madeira/plástico:

- T1 - 100% de *E. grandis*, 0% de plástico, 8% de uréia-formaldeído;
- T2 - 75% de *E. grandis*, 25% de PP, 8% de uréia-formaldeído;
- T3 - 50% de *E. grandis*, 50% de PP, 8% de uréia-formaldeído;
- T4 - 75% de *E. grandis*, 25% de PEAD, 8% de uréia-formaldeído;
- T5 - 50% de *E. grandis*, 50% de PEAD, 8% de uréia-formaldeído;
- T6 - 75% de *E. grandis*, 25% de PEBD, 8% de uréia-formaldeído;
- T7 - 50% de *E. grandis*, 50% de PEBD, 8% de uréia-formaldeído;
- T8 - 100% de *E. grandis*, 0% de plástico, 8% de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi;
- T9 - 75% de *E. grandis*, 25% de PP, 8% de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi;
- T10 - 50% de *E. grandis*, 50% de PP, 8% de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi;
- T11 - 75% de *E. grandis*, 25% de PEAD, 8% de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi;
- T12 - 50% de *E. grandis*, 50% de PEAD, 8% de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi;
- T13 - 75% de *E. grandis*, 25% de PEBD, 8% de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi;
- T14 - 50% de *E. grandis*, 50% de PEBD, 8% de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi;
- T15 - 100% de *E. grandis*, 0% de plástico, 8% de fenol-formaldeído;

- T16 - 75% de *E. grandis*, 25% de PP, 8% de fenol-formaldeído;
- T17 - 50% de *E. grandis*, 50% de PP, 8% de fenol-formaldeído;
- T18 - 75% de *E. grandis*, 25% de PEAD, 8% de fenol-formaldeído;
- T19 - 50% de *E. grandis*, 50% de PEAD, 8% de fenol-formaldeído;
- T20 - 75% de *E. grandis*, 25% de PEBD, 8% de fenol-formaldeído; e
- T21 - 50% de *E. grandis*, 50% de PEBD, 8% de fenol-formaldeído.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Densidade

Segundo a norma ANSI/A1-280/93, os painéis com densidade entre 0,64 e 0,8 g/cm³ são classificados como painéis de média densidade e abaixo de 0,64 g/cm³, classificados como painéis de baixa densidade.

O valor médio da densidade determinada nos painéis foi de 0,74 g/cm³. De acordo com a análise de variância (Quadro 1A) a 5% de probabilidade, pelo teste F, não se observou diferença significativa entre os tratamentos, portanto pode-se concluir que a densidade não teve influência nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

5.2. Umidade

A umidade de equilíbrio higroscópico da madeira varia de acordo com a temperatura e a umidade relativa do ar.

No Quadro 7 e na Figura 4 estão os valores médios do teor de umidade dos painéis após o equilíbrio à temperatura de 20 ± 3 °C e umidade de $65 \pm 5\%$. Estes valores são compatíveis com aqueles indicados pela TAFISA, para painéis de madeira aglomerada (CARNEIRO, 2002).

A análise de variância (Quadro 2A) indicou que o teor de umidade de equilíbrio foi afetado pelos tratamentos e que existe interação significativa entre o tipo de adesivo e a composição das partículas.

Quadro 7 – Valores médios de umidade de equilíbrio (%) para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e do tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
Madeira/Plástico			
100%M	8,16 C a	8,89 B a	9,39 A a
75%M 25%PP	6,22 A b	6,73 A b	6,59 A b
50%M 50%PP	4,47 A c	4,60 A c	4,76 A c
75%M 25%PEAD	6,20 A b	6,14 A b	7,08 A b
50%M 50%PEAD	4,35 A d	4,54 A c	4,83 A c
75%M 25%PEBD	6,38 A b	6,67 A b	6,84 A b
50%M 50%PEBD	4,34 A d	4,63 A c	4,58 A c

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

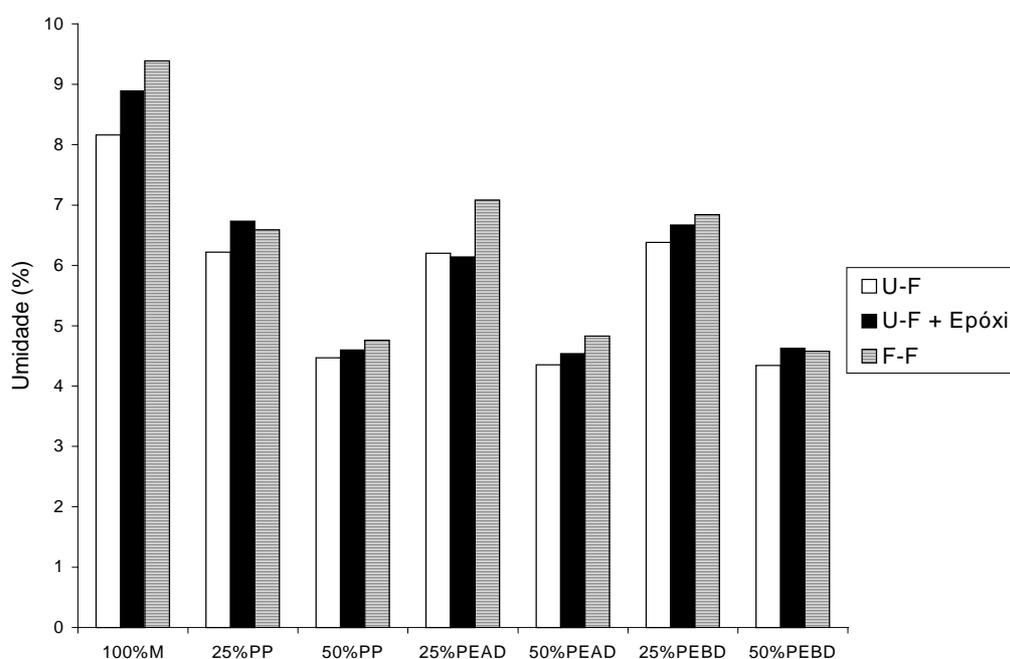


Figura 4 – Valores médios de umidade de equilíbrio (%) a 20 ± 3 °C e 65 ± 5 % de umidade para os diferentes tratamentos.

Desdobrando-se o efeito dos tratamentos, observa-se pelo Quadro 7 que não houve diferença significativa entre os tipos de adesivo para painéis produzidos com 25 ou 50% de resinas termoplásticas, no entanto o teor de umidade de equilíbrio dos painéis produzidos apenas com partículas de madeira foi significativamente maior para aqueles fabricados com o adesivo à base de fenol-formaldeído.

Nota-se, ainda no Quadro 7, que o teor de umidade dos painéis produzidos com partículas de madeira pura foi significativamente maior do que aqueles produzidos com resinas termoplásticas. Provavelmente, o caráter hidrofóbico do plástico diminuiu a absorção de vapor d'água, ocasionando menor porcentagem de umidade dos painéis.

Verifica-se também (Quadro 7) que para o mesmo teor de resina termoplástica (25 ou 50%) não houve diferença no teor de umidade de equilíbrio, exceto para painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído, com 50% de partículas de PP, que apresentaram teor de umidade de equilíbrio significativamente maior do que aqueles produzidos com resinas termoplásticas do tipo polietileno.

O aumento de 25 para 50% no teor de resina termoplástica reduziu significativamente a umidade de equilíbrio higroscópico, independentemente do tipo de adesivo.

Os maiores valores médios observados para a umidade de equilíbrio foram encontrados em painéis produzidos com partículas de madeira pura. A adição e o aumento no teor de resina termoplástica diminuíram a porcentagem de umidade de equilíbrio dos painéis, o que é uma característica interessante, uma vez que a mudança excessiva no teor de umidade pode ocasionar fendas ou empenamentos em painéis.

5.3. Tração perpendicular

O teste de tração perpendicular é um dos principais parâmetros para medir a adesão entre as partículas. Os painéis que apresentam maior tração perpendicular são de melhor qualidade, pois possuem melhor ligação entre as partículas (MALONEY, 1977).

Pode-se observar pela análise de variância (Quadro 3A) que a tração perpendicular à superfície foi afetada pelos tratamentos e que existe interação significativa entre a composição das partículas e o tipo de adesivo. As médias desdobradas estão no Quadro 8 e na Figura 5.

Quadro 8 – Valores médios de tração perpendicular (kgf) para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
Madeira/plástico			
100%M	9,26 A b	5,71 B c	9,33 A a
75%M 25%PP	5,01 A d	4,91 A d	5,90 A b
50%M 50%PP	3,95 A e	4,89 A d	2,01 A e
75%M 25%PEAD	11,84 A a	11,67 A a	8,47 B a
50%M 50%PEAD	11,10 A a	8,25 A b	8,60 A a
75%M 25%PEBD	8,94 A b	9,18 A b	3,38 B d
50%M 50%PEBD	6,63 A c	5,52 A c	4,83 A c

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

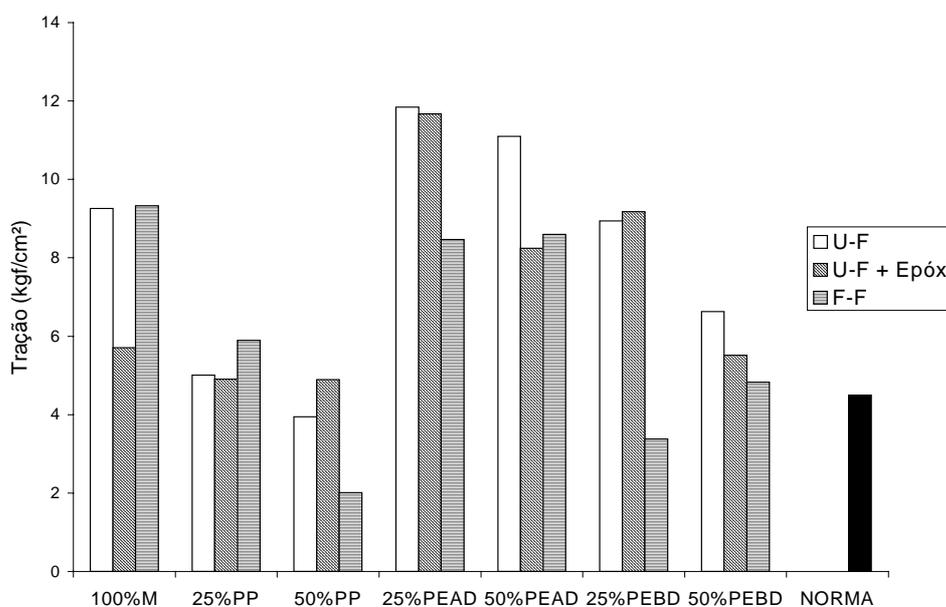


Figura 5 – Valores médios observados de tração perpendicular (kgf/cm²) nos diferentes tratamentos e valor mínimo estabelecido pela norma ANSI/A1-280/93.

À exceção dos painéis produzidos com 50% PP, utilizando os adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, e daqueles produzidos com 25% de PEBD, utilizando o adesivo de fenol-formaldeído, os demais painéis superaram o valor preconizado pela norma ANSI/A1-280/93, que exige uma resistência à tração mínima de 4,5 kgf/cm².

Pelo Quadro 8, verifica-se que os painéis produzidos com partículas de madeira pura, utilizando o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi, apresentaram menor resistência do que aqueles produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, ou seja, a adição de 0,5% de epóxi no adesivo de uréia-formaldeído prejudicou a adesão entre as partículas de madeira.

Os painéis produzidos com 25% de resinas termoplásticas, do tipo polietileno e adesivo de fenol-formaldeído, foram significativamente menos resistentes do que aqueles fabricados com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi.

Analisando o Quadro 8 nota-se que, de modo geral, os painéis produzidos apenas com partículas de madeira foram significativamente mais resistentes do que aqueles produzidos com PP e PEBD, exceto para painéis com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi com 25% de PEBD.

Observa-se ainda que os painéis produzidos com PEAD foram significativamente mais resistentes do que aqueles produzidos com partículas de madeira pura, entretanto para painéis produzidos com o adesivo de fenol-formaldeído não houve diferença significativa.

O acréscimo de 25 para 50% no teor de resina termoplástica diminuiu significativamente a resistência dos painéis produzidos com PEBD e PP, utilizando os adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, no entanto para aqueles produzidos com adesivo de uréia-formaldeído + 0,5 de epóxi constatou-se que apenas os painéis com PEAD foram afetados significativamente, diminuindo a resistência à tração perpendicular à superfície.

Comparando o mesmo teor de resinas termoplásticas (25 ou 50%), verifica-se (Quadro 8) que, independentemente do tipo de adesivo, os painéis produzidos com PEAD foram significativamente mais resistentes do que aqueles produzidos com PEBD, que, por sua vez, foram significativamente mais resistentes do que os painéis produzidos com PP. Provavelmente, a forma das partículas e o ponto de fusão das resinas termoplásticas de

polietileno influenciaram de forma positiva a resistência à tração perpendicular à superfície.

5.4. Arrancamento de parafuso

A resistência ao arrancamento de parafusos é uma propriedade importante, principalmente em painéis utilizados na indústria moveleira.

Os valores médios de resistência ao arrancamento de parafusos perpendiculares à superfície estão representados no Quadro 9 e na Figura 6. Verifica-se que todos os painéis tiveram resistências superiores ao mínimo estipulado pela norma ANSI/A1-280/93, que estabelece para painéis de média densidade um valor mínimo de resistência igual a 100 kgf.

De acordo com a análise de variância (Quadro 4A), observa-se que apenas a composição das partículas afetou de forma significativa a resistência ao arrancamento de parafuso.

Quadro 9 – Valores médios do arrancamento de parafuso (kgf) para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas

Composição das Partículas	
100%M	127,00 c d
75%M 25%PP	137,18 b c
50%M 50%PP	123,00 d
75%M 25%PEAD	153,38 a
50%M 50%PEAD	139,31 b c
75%M 25%PEBD	144,30 a b
50%M 50%PEBD	130,00 c d

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

Analisando o Quadro 9 observa-se que, exceto para os painéis com partículas de PP, aqueles produzidos com 25% de resinas termoplásticas foram significativamente mais resistentes do que os produzidos com partículas de madeira pura.

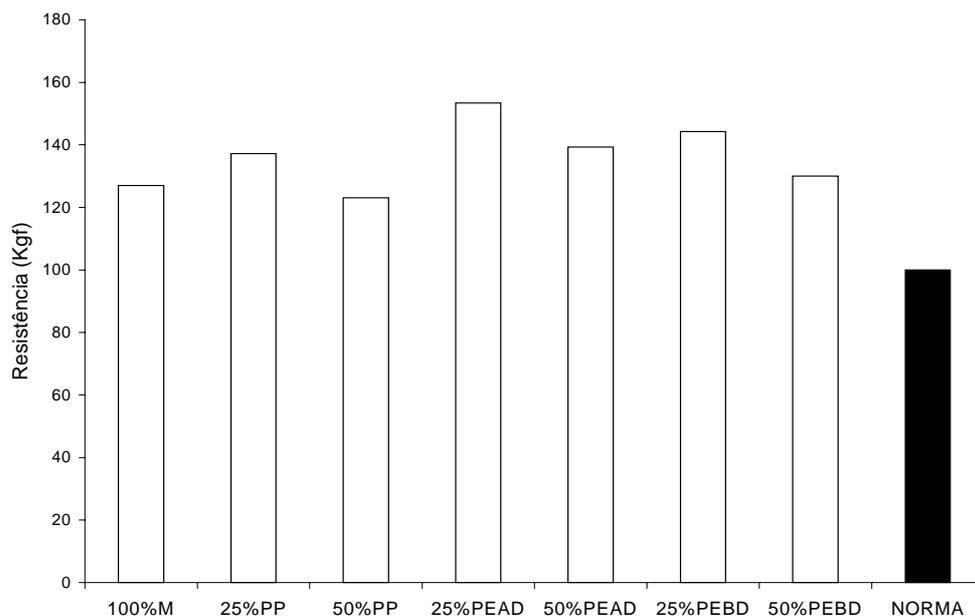


Figura 6 – Valores médios do arrancamento de parafuso (kgf) nos diferentes tratamentos e valor mínimo estabelecido pela norma ANSI/A1-280/93.

Verifica-se ainda que o acréscimo de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas diminuiu significativamente a resistência ao arrancamento de parafuso dos painéis. Provavelmente a maior porcentagem de resinas termoplásticas tornou os painéis com características mais próximas do plástico, ocasionando menor resistência.

Os painéis produzidos com 25% de resinas termoplásticas do tipo polietileno apresentaram os maiores valores médios de resistência. Provavelmente a forma e o ponto de fusão das resinas termoplásticas melhoraram a adesão entre o plástico e a madeira, ocasionando maior resistência ao arrancamento de parafuso.

5.5. Dureza Janka

O teste de dureza Janka é um ótimo parâmetro para medir a qualidade do painel para fabricação de pisos, pois ele mede a resistência que um painel oferece ao esforço exercido para penetração da metade de uma esfera de 11,3 mm de diâmetro.

Pela análise de variância (Quadro 5A), verifica-se que o teste de dureza Janka foi afetado pelos tratamentos e que existe interação significativa entre a composição das partículas e o tipo de adesivo. As médias desdobradas estão no Quadro 10 e na Figura 7.

Quadro 10 – Valores médios de dureza Janka (kgf/cm²) para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivos

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
100%M	494,95 B c	376,08 C d	564,94 A a
75%M 25%PP	536,28 A b	512,86 A b	470,96 A b
50%M 50%PP	667,29 A a	630,53 A a	435,39 A c
75%M 25%PEAD	571,41 A b	498,68 A b	504,41 A a
50%M 50%PEAD	409,31 A e	458,94 A c	470,85 A b
75%M 25%PEBD	518,99 A c	492,45 A b	451,38 A b
50%M 50%PEBD	445,33 A d	497,24 A b	462,04 A b

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

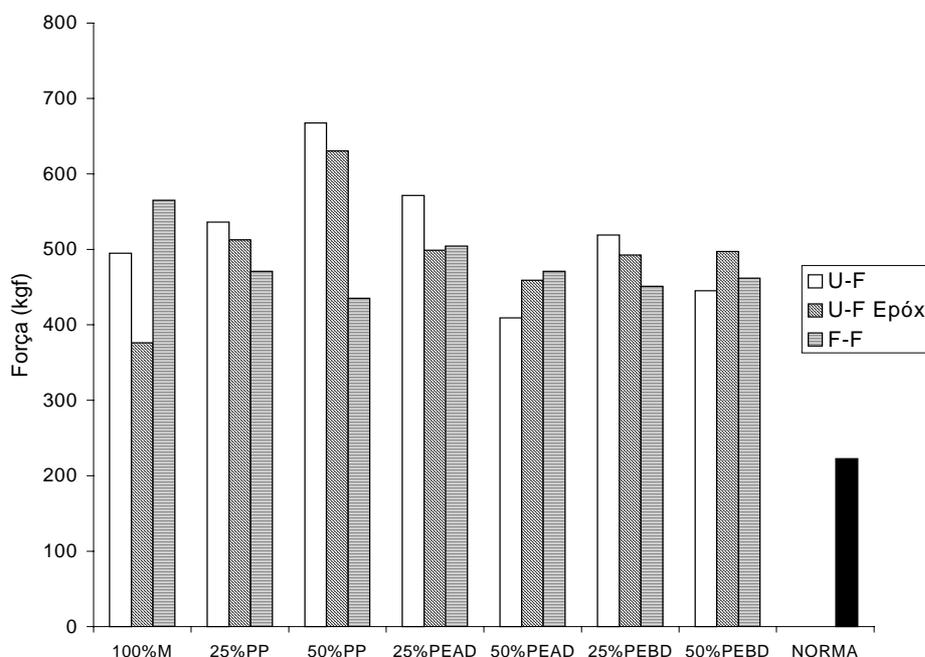


Figura 7 – Valores médios de dureza Janka (kgf/cm²) nos diferentes tratamentos e valor mínimo estabelecido pela norma ANSI/A1-280/93.

Comparando o tipo de adesivo, observa-se (Quadro 10) que não houve diferença significativa entre painéis com resinas termoplásticas. Já para os painéis produzidos apenas com partículas de madeira, nota-se que houve diferença significativa para os três tipos de adesivos utilizados, sendo o adesivo de fenol-formaldeído mais resistente.

Considerando a composição das partículas, observa-se (Quadro 10) que os painéis produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi com 50% de PP foram significativamente mais resistentes do que aqueles produzidos com resinas termoplásticas do tipo polietileno, entretanto para painéis com adesivo de fenol-formaldeído verifica-se que aqueles com 50% de resinas termoplásticas do tipo polietileno foram significativamente mais resistentes do que painéis com 50% de PP.

Observa-se também (Quadro 10) que não houve diferença significativa entre painéis produzidos com 25% de resina termoplástica, utilizando o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, no entanto nota-se que aqueles com adesivo de uréia-formaldeído com 25% de partículas de PP foram significativamente mais resistentes do que produzidos com resinas termoplásticas do tipo polietileno. Já os painéis com adesivo de fenol-formaldeído produzidos com 25% de PP apresentaram significativamente menor resistência do que os painéis produzidos com 25% de resinas termoplásticas do tipo polietileno.

O aumento de 25 para 50% no teor de PEAD diminuiu significativamente a resistência dos painéis, independentemente do tipo de adesivo utilizado. Já para painéis produzidos com PEBD, de modo geral, não houve diferença significativa, exceto para aqueles com adesivo de uréia-formaldeído, em que painéis com 25% de PEBD foram significativamente mais resistentes do que aqueles produzidos com 50% de PEBD.

Os painéis produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi com 50% de PP foram mais resistentes do que aqueles com 25% de PP, entretanto para painéis com adesivo de fenol-formaldeído nota-se que o aumento de 25 para 50% no teor de PP diminuiu a resistência dos painéis.

Comparando os valores médios no Quadro 10 e na Figura 7, verifica-se que todos os painéis apresentaram valores superiores ao exigido pela norma ANSI/A1-280/93, que estabelece o valor mínimo de 222,5 kgf/cm²,

considerando-se que os painéis com maior resistência ao arrancamento de parafuso foram aqueles produzidos com 50% de PP com adesivo de uréia-formaldeído, cujo valor médio foi 35% superior ao valor determinado nos painéis produzidos apenas com partículas de madeira. Provavelmente a propriedade de dureza do próprio PP melhorou a qualidade dos painéis para serem utilizados como pisos.

5.6. Resistência à flexão estática

A resistência à flexão estática representa a tensão máxima desenvolvida em uma barra sujeita ao dobramento. O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) são dois parâmetros, normalmente, determinados no teste de flexão estática. Tais valores são de grande importância, pois oferecem uma boa aproximação da resistência do material.

Entende-se por módulo de elasticidade (MOE) algo relacionado à rigidez do material ou à sua capacidade de deformar-se em maior ou menor grau, em função de uma carga aplicada, e logo após conseguir voltar à forma inicial. Caso a carga aplicada seja capaz de romper o material, o módulo de ruptura (MOR) seria a carga máxima aplicada.

5.6.1. Módulo de ruptura (MOR)

De acordo com a análise de variância (Quadro 6A), verifica-se que o módulo de ruptura foi afetado pelos tratamentos e que existe interação significativa entre o tipo de adesivo e a composição das partículas. As médias desdobradas para o módulo de ruptura estão no Quadro 11 e na Figura 8.

Nota-se pelo Quadro 11 que os painéis produzidos com PP e adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi foram significativamente mais resistentes do que painéis fabricados com adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, ou seja, a adição de 0,5% de epóxi no adesivo de uréia-formaldeído aumentou a resistência dos painéis para o módulo de ruptura.

Observa-se, ainda, que os painéis produzidos com 50% de PEBD e adesivo de uréia-formaldeído foram significativamente mais resistentes do que aqueles produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi e fenol-formaldeído.

Quadro 11 – Valores médios do módulo de ruptura (kgf/cm^2) para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
Madeira/plástico			
100%M	187,00 A a	175,45 A a	179,50 A a
75%M 25%PP	138,38 B d	165,40 A b	134,00 B d
50%M 50%PP	142,20 B d	169,98 A b	130,00 B d
75%M 25%PEAD	176,25 A b	170,75 A b	168,62 A b
50%M 50%PEAD	154,98 A c	144,40 A c	150,35 A c
75%M 25%PEBD	170,57 A b	167,80 A b	150,88 A c
50%M 50%PEBD	154,82 A c	131,57 B d	132,60 B d

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

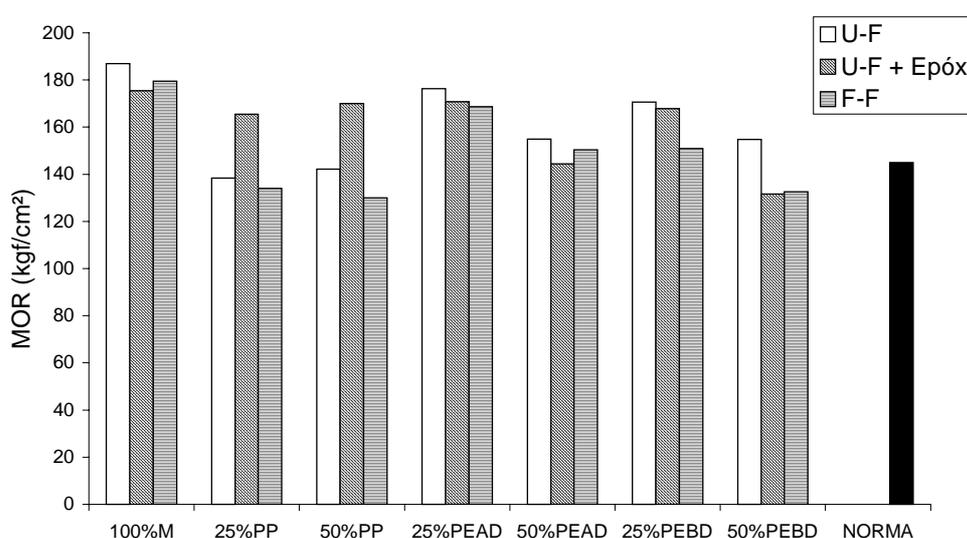


Figura 8 – Valores médios do módulo de ruptura (kgf/cm^2) nos diferentes tratamentos e valor mínimo estabelecido pela norma ANSI/A1-280/93.

Analisando o efeito da composição das partículas, nota-se (Quadro 11) que os painéis produzidos com partículas de madeira pura foram significativamente mais resistentes do que aqueles fabricados com partículas de

resinas termoplásticas. Provavelmente, a adição de plástico como substituto parcial das partículas de madeira diminuiu a resistência dos painéis, visto que o plástico é um material menos rígido que a madeira.

Observa-se também que, com exceção dos painéis produzidos com fenol-formaldeído com 50% de PP e PEBD, onde não houve diferença significativa, os painéis fabricados com adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído com resinas termoplásticas do tipo polietileno foram significativamente mais resistentes do que aqueles produzidos com PP. Já os painéis fabricados com adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo 50% de PP, apresentaram significativamente maior resistência do que aqueles produzidos com 50% de PEAD, que, por sua vez, foram significativamente mais resistentes do que os painéis com 50% de PEBD.

Constatou-se ainda (Quadro 11) que não houve diferença significativa em painéis produzidos com adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo 25% de resinas termoplásticas.

O aumento de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas do tipo polietileno diminuiu significativamente a resistência dos painéis, independentemente do tipo de adesivo utilizado. Já para painéis fabricados com PP, observou-se (Quadro 11) que não houve diferença significativa.

O valor mínimo do módulo de ruptura (MOR), determinado pela norma ANSI/A1-280/93 para painéis de madeira aglomerada de média densidade, é de 145 kgf/cm².

Observa-se pelo Quadro 11 e pela Figura 8 que os painéis produzidos com 25 e 50% de PP não atingem o valor mínimo preconizado pela norma, exceto quando se utiliza o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi.

Verifica-se, também, que a maioria dos painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas do tipo polietileno não atinge o valor mínimo determinado pela norma, exceto quando foram utilizados o adesivo de uréia-formaldeído e o adesivo fenol-formaldeído em painéis produzidos com PEAD.

5.6.2. Módulo de elasticidade (MOE)

De acordo com a análise de variância (Quadro 7A), verificou-se que o módulo de elasticidade foi afetado pelos tratamentos e que existe interação

significativa entre o tipo de adesivo e a composição das partículas. As médias desdobradas para o módulo de elasticidade estão listadas no Quadro 12 e na Figura 9.

Quadro 12 – Valores médios do módulo de elasticidade (kgf/cm²) para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
100%M	22.668,12 A a	22.479,50 A a	21.805,20 A a
75%M 25%PP	14.911,03 B d	19.680,55 A a	16.062,17 B c
50%M 50%PP	14.833,85 B d	19.983,15 A a	14.821,88 B e
75%M 25%PEAD	21.623,35 A a	19.745,53 A a	19.246,05 A b
50%M 50%PEAD	17.489,05 A c	15.362,80 A c	17.307,68 A c
75%M 25%PEBD	19.230,88 A b	19.232,12 A b	18.953,72 A b
50%M 50%PEBD	16.301,95 A c	13.397,15 A d	15.151,35 A d

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

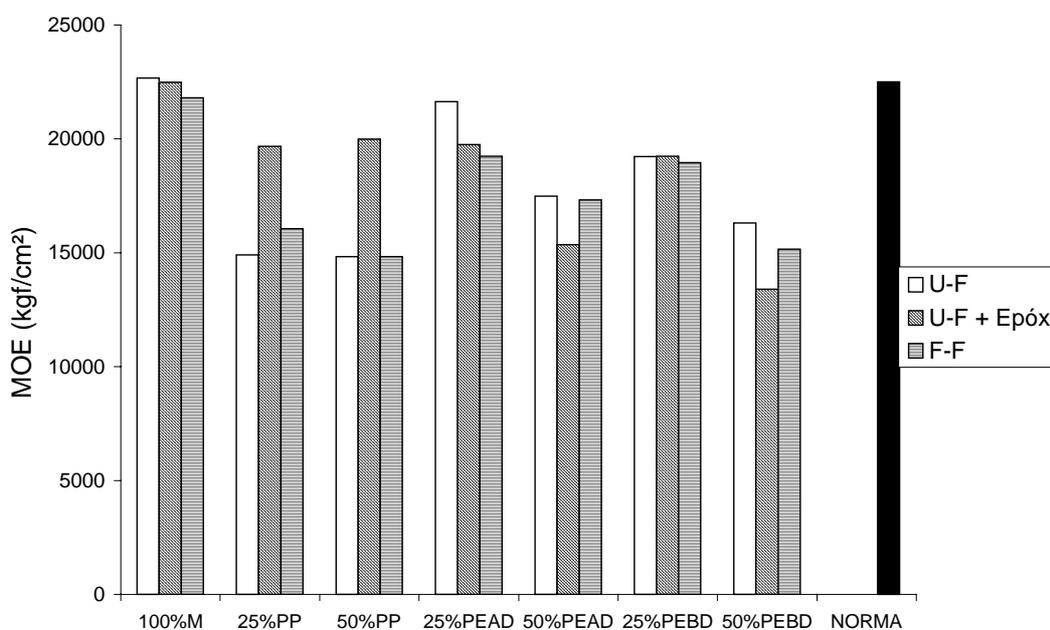


Figura 9 – Valores médios do módulo de elasticidade (kgf/cm²) nos diferentes tratamentos e valor mínimo estabelecido pela norma ANSI/A1-280/93.

Analisando o Quadro 12, nota-se que o tipo de adesivo não afetou de forma significativa os painéis produzidos com resinas termoplásticas de polietileno e painéis fabricados apenas com partículas de madeira, no entanto verifica-se que para aqueles com PP o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi foi significativamente mais resistente do que os adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído. Provavelmente, a adição de 0,5% de epóxi no adesivo de uréia-formaldeído aumentou a resistência dos painéis para o módulo de elasticidade.

Os painéis produzidos com adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, contendo 25 ou 50% de resinas termoplásticas dos tipo polietileno, foram significativamente mais resistentes do que aqueles fabricados com partículas de PP, no entanto painéis com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo 25 ou 50% de partículas de PEBD, apresentaram-se significativamente menos resistentes do que aqueles produzidos com PP e PEAD.

Constatou-se (Quadro 12) que, com exceção dos painéis produzidos com adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo partículas de PP e PEAD, e aqueles fabricados com adesivo de uréia-formaldeído, contendo 25% de PEAD, os painéis produzidos apenas com partículas de madeira foram significativamente mais resistentes do que aqueles fabricados com resinas termoplásticas. Provavelmente, esses painéis possuem maior limite de proporcionalidade, ocasionando aumento no módulo de elasticidade.

O acréscimo de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas, de modo geral, diminuiu a resistência dos painéis, exceto para aqueles produzidos com adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo partículas de PP. Pode ser que painéis com maior porcentagem de resinas termoplásticas apresentarem propriedades mais próximas do plástico, ocasionando menor módulo de elasticidade.

Os valores médios apresentados no Quadro 12 e na Figura 9 mostram que, com exceção do tratamento 1 (100%M + 8% Uréia-formaldeído), todos os outros apresentaram valores abaixo da norma ANSI/A1-280/93, que estabelece o valor mínimo de 22.500 kgf/cm² para painéis de madeira aglomerada de média densidade.

5.7. Absorção de água e inchamento em espessura

A absorção de água e o inchamento em espessura dependem da umidade, do tempo e da temperatura de exposição.

Os efeitos da umidade sobre os painéis alteram as suas propriedades e comprometem o seu uso em condições estruturais e em ambiente externo. Inúmeras variáveis do processo interferem no inchamento em espessura, devido a umidade, espécie, geometria das partículas, densidade da chapa, teor de resina e condições de prensagem (SILVA, 2000). Segundo a maioria dos pesquisadores, o inchamento em espessura e a absorção de água aumentam com o aumento da densidade da chapa.

5.7.1. Absorção de água após 2 e 24 horas

Pode-se observar pela análise de variância (Quadros 8A e 9A) que a absorção de água dos painéis, após 2 e 24 horas de imersão, foi afetada pelos tratamentos e que existe interação significativa entre o tipo de adesivo e a composição das partículas. As médias desdobradas para absorção de água após 2 e 24 horas de imersão estão nos Quadros 13 e 14 e nas Figuras 10 e 11.

Quadro 13 – Valores médios de absorção de água (%) após 2 horas de imersão para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
100%M	16,08 B a	16,79 B a	62,20 A a
75%M 25%PP	14,17 B a	13,16 B a	58,51 A a
50%M 50%PP	10,28 B b	9,29 B c	51,09 A b
75%M 25%PEAD	11,75 B a	10,68 B b	39,09 A c
50%M 50%PEAD	8,57 B d	7,66 B d	35,51 A d
75%M 25%PEBD	15,33 B a	15,03 B a	51,77 A b
50%M 50%PEBD	9,41 B c	7,30 B d	44,29 A c

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

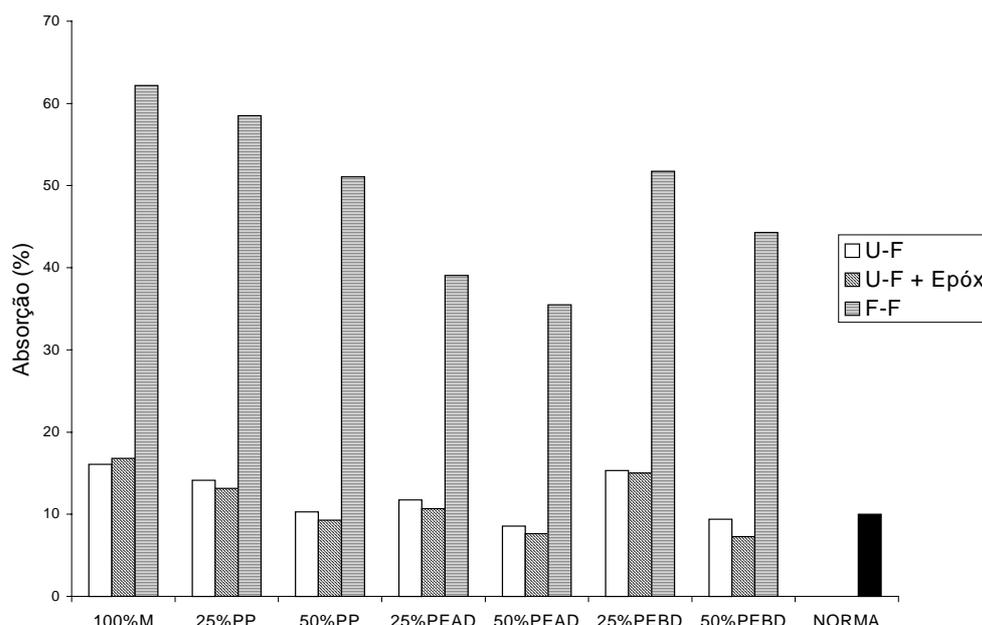


Figura 10 – Valores médios de absorção de água (%) após 2 horas de imersão nos diferentes tratamentos e valor máximo estabelecido pela norma CSA 0437-1993.

Conforme os valores apresentados no Quadro 13, verifica-se que os painéis produzidos com o adesivo de fenol-formaldeído absorveram significativamente mais água do que aqueles produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, ou seja, o adesivo de fenol-formaldeído afetou os painéis, ocasionando maior absorção de água, em porcentagem.

Segundo CARNEIRO (2002), os adesivos de fenol-formaldeído possuem como característica boa resistência à umidade, porém esta propriedade não foi verificada no teste de absorção em água após 2 horas.

Verifica-se (Quadro 13) que, independentemente do tipo de adesivo, os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas do tipo polietileno absorveram significativamente menor porcentagem de água do que aqueles produzidos com PP. Provavelmente, a forma das partículas do PEAD e PEBD influenciou de forma positiva para diminuir a absorção de água dos painéis.

Observa-se, ainda, que os painéis contendo os adesivos de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi e fenol-formaldeído, com 25% de PEAD, absorveram significativamente menor porcentagem de água do que aqueles

produzidos com 25% de PEBD e PP, no entanto para painéis fabricados com o adesivo de uréia-formaldeído não houve diferença significativa para os diferentes tipos de resinas termoplásticas.

Os painéis produzidos apenas com partículas de madeira absorveram significativamente mais água do que aqueles produzidos com 50% de resinas termoplásticas, independentemente do tipo de adesivo, entretanto verifica-se (Quadro 13) que, com exceção dos painéis com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi com 25% PEAD e painéis com fenol-formaldeído contendo 25% de PEAD e PEBD, não houve diferença significativa entre painéis apenas com partículas de madeira e aqueles fabricados com 25% de resinas termoplásticas.

O aumento de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas diminuiu significativamente a absorção de água dos painéis. Provavelmente, o caráter hidrofóbico do plástico influenciou de forma positiva, acarretando menor absorção de água.

Analisando o Quadro 13 e a Figura 10, verifica-se que, com exceção dos painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído contendo 50% de PEAD ou PEBD e também aqueles com 50% de resinas termoplásticas, utilizando o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, todos os tratamentos ultrapassaram o valor máximo preconizado pela norma CSA 0437-1993, que estabelece que a absorção de água após 2 horas de imersão deve ficar em torno de 10% para painéis de média densidade.

Os resultados apresentados no Quadro 14 e na Figura 11 mostram que a adição de 0,5% de epóxi no adesivo de uréia-formaldeído não influenciou significativamente as propriedades dos painéis após 24 horas de imersão em água, entretanto os painéis contendo o adesivo de fenol-formaldeído absorveram significativamente maior porcentagem de água do que aqueles produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi.

Pelo Quadro 14 verifica-se que, com exceção dos painéis contendo 25% de PP com adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi e aqueles fabricados com 25% de PEBD contendo os adesivos de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi e fenol-formaldeído, os painéis produzidos com resinas termoplásticas absorveram significativamente menos água do que aqueles produzidos com

partículas de madeira pura. Provavelmente o caráter hidrofóbico do plástico influenciou de forma positiva, diminuindo a porcentagem de absorção de água.

Quadro 14 – Valores médios de absorção de água (%) após 24 horas de imersão para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
Madeira/plástico			
100%M	35,94 B a	41,65 B a	83,95 A a
75%M 25%PP	33,27 B a	33,72 B a	69,87 A b
50%M 50%PP	26,11 B a	21,71 B c	61,82 A c
75%M 25%PEAD	30,12 B a	26,87 B b	61,68 A c
50%M 50%PEAD	18,00 B b	17,16 B d	44,26 A d
75%M 25%PEBD	34,32 B a	35,31 B a	72,55 A a
50%M 50%PEBD	20,31 B b	16,22 B d	49,22 A d

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

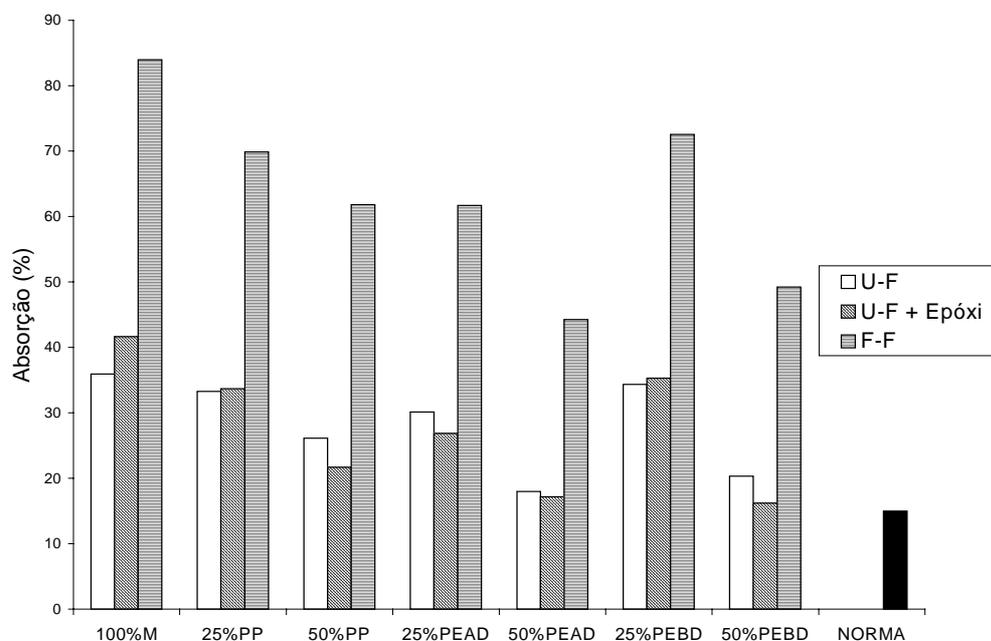


Figura 11 – Valores médios de absorção de água (%) após 24 horas de imersão nos diferentes tratamentos e valor máximo estabelecido pela norma CSA 0437-1993.

Independentemente do tipo de adesivo, observa-se (Quadro 14) que os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas do tipo polietileno absorveram significativamente menor porcentagem de água do que aqueles produzidos com 50% de PP.

Verifica-se, ainda, que os painéis contendo os adesivos de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi e fenol-formaldeído, produzidos com 25% de PEAD, absorveram significativamente menor porcentagem de água do que aqueles produzidos com 25% de PEBD e PP, no entanto não houve diferença significativa para painéis produzidos com adesivo de uréia-formaldeído contendo 25% de resinas termoplásticas.

De modo geral, o aumento de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas diminuiu a porcentagem de absorção de água dos painéis, exceto para aqueles produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído contendo partículas de PP.

Observa-se no Quadro 14 e na Figura 11 que todos os tratamentos ultrapassam o valor máximo estipulado pela norma CSA 0437-1993, que estabelece para painéis de média densidade uma absorção de água em torno de 15%, no entanto os painéis produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi com 50% de PEAD apresentaram os menores valores médios em porcentagem de absorção de água. Provavelmente a geometria das partículas do PEAD permitiu melhor distribuição do plástico no painel, diminuindo a absorção de água, tornando-os aptos para serem utilizados em ambientes externos e mais úmidos.

5.7.2. Inchamento em espessura após 2 e 24 horas

Pela análise de variância (Quadros 10A e 11A), verifica-se que o inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água foi afetado pelos tratamentos e que existe interação significativa entre a composição das partículas e o tipo de adesivo. As médias desdobradas para inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água estão nos Quadros 15 e 16 e nas Figuras 12 e 13.

Nota-se (Quadro 15) que os painéis produzidos com o adesivo de fenol-formaldeído contendo apenas partículas de madeira ou partículas de PP

incharam mais significativamente do que aqueles produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% epóxi.

Quadro 15 – Valores médios do inchamento em espessura (%) após 2 horas de imersão em água para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
Madeira/plástico			
100%M	7,13 B a	9,11 B a	21,27 A a
75%M 25%PP	6,53 B a	6,86 B a	12,57 A b
50%M 50%PP	5,25 B b	5,92 B a	9,03 A c
75%M 25%PEAD	6,18 A a	7,70 A a	9,68 A b
50%M 50%PEAD	5,28 A b	6,00 A a	6,49 A d
75%M 25%PEBD	9,30 A a	6,48 A a	10,96 A b
50%M 50%PEBD	6,04 A b	4,01 A b	7,43 A d

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

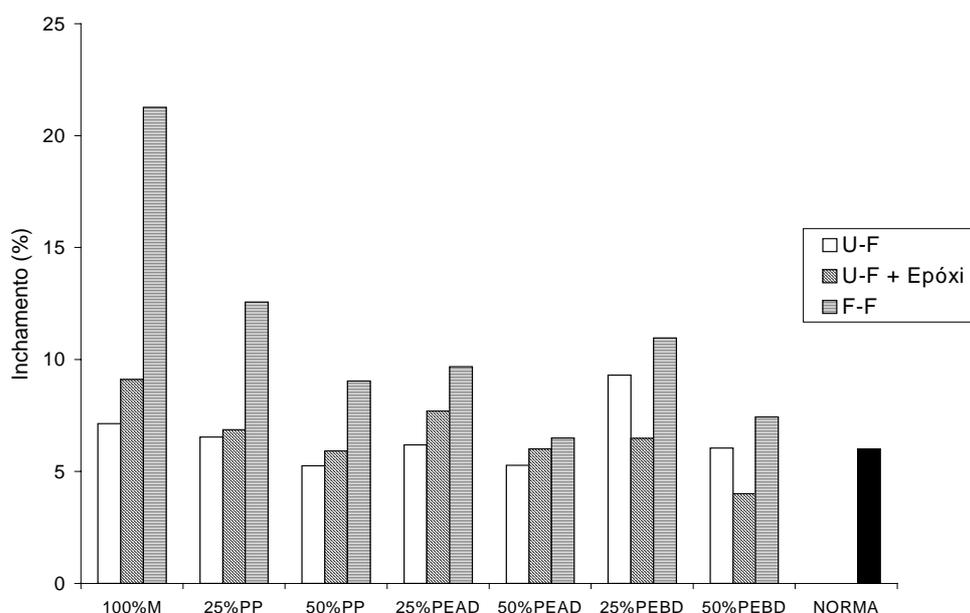


Figura 12 – Valores médios do inchamento em espessura (%) após 2 horas de imersão em água nos diferentes tratamentos e valor máximo estabelecido pela norma DIN 68m761 (1).

Verifica-se (Quadro 15) que independentemente do tipo de adesivo não houve diferença significativa entre painéis produzidos com 25% de resinas termoplásticas.

Observa-se, também, que os painéis produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi e fenol-formaldeído contendo resinas termoplásticas dos tipo polietileno, de modo geral, incharam menos significativamente do que aqueles produzidos com PP, exceto para painéis fabricados com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi contendo partículas de PEAD e PP. Já para painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído, verifica-se que não houve diferença significativa entre os diferentes tipos de resinas termoplásticas.

Analisando o Quadro 15 observa-se que, com exceção dos painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo 50% de partículas de PEAD e PP, os demais painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas incharam menos significativamente do que aqueles fabricados com partículas de madeira pura. Já para painéis produzidos com 25% de resinas termoplásticas, observa-se que somente aqueles contendo o adesivo de fenol-formaldeído incharam menos significativamente do que os painéis produzidos apenas com partículas de madeira.

Pelo Quadro 15 verifica-se que, exceto para painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo partículas de PP ou PEAD, o aumento de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas reduziu significativamente o inchamento em espessura. Provavelmente, o caráter hidrofóbico do plástico diminuiu a absorção de água dos painéis, ocasionando o seu menor inchamento.

No Quadro 15 e na Figura 12 observa-se que, com exceção dos painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído contendo 50% de PP e PEAD e também daqueles painéis fabricados com adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% epóxi com 50% de resinas termoplásticas, todos os painéis ultrapassaram o valor máximo permitido pela norma DIN 68m761 (1), que estabelece para painéis de média densidade o inchamento em espessura em torno de 6%.

Verifica-se (Quadro 16) que os painéis produzidos apenas com partículas de madeira contendo o adesivo de fenol-formaldeído incharam mais significativamente do que aqueles produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído, que,

por sua vez, incharam mais significativamente do que os painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, no entanto para painéis que contêm resinas termoplásticas nota-se que não houve diferença significativa entre o tipo de adesivo.

Independentemente do tipo de adesivo utilizado, constata-se (Quadro 16) que os painéis produzidos apenas com partículas de madeira incharam mais significativamente do que aqueles produzidos com resinas termoplásticas. Provavelmente, o caráter hidrofílico das partículas de madeira aumenta a porcentagem de absorção de água dos painéis, acarretando uma maior liberação das tensões de prensagem e, conseqüentemente, inchando mais.

Observa-se, no Quadro 16, que os painéis produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído, contendo 25% de resinas termoplásticas do tipo polietileno, incharam menos significativamente do que aqueles produzidos com partículas de PP, entretanto para painéis com 25% de resinas termoplásticas contendo os adesivos de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi e fenol-formaldeído não houve diferença significativa.

Nota-se também que, de modo geral, os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas do tipo polietileno incharam menos significativamente do que aqueles fabricados com 50% de PP, exceto para aqueles com o adesivo de fenol-formaldeído e partículas de PP e PEAD.

De acordo com os valores médios apresentados no Quadro 16 e na Figura 13, verifica-se que com exceção dos painéis produzidos com partículas de madeira pura e aqueles produzidos com 25% de PP ou PEBD, contendo o adesivo de uréia-formaldeído, todos os outros tratamentos não ultrapassaram o valor máximo estabelecido pela norma DIN 68m761 (1).

O acréscimo de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas diminuiu significativamente o inchamento em espessura dos painéis, exceto para aqueles produzidos com o adesivo de uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, contendo partículas de PP. Provavelmente, o caráter hidrofóbico do plástico reduziu a absorção de água dos painéis, ocasionando menor inchamento em espessura, portanto observa-se que os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas são melhores para ser utilizados em ambiente mais externo.

Quadro 16 – Valores médios do inchamento em espessura (%) após 24 horas de imersão em água para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas e tipo de adesivo

Composição das Partículas	Tipo de Adesivo		
	Uréia-formaldeído	Uréia-formaldeído + epóxi	Fenol-formaldeído
100%M	21,75 B a	18,50 C a	30,02 A a
75%M 25%PP	17,41 A b	14,33 A b	14,61 A b
50%M 50%PP	11,63 A e	10,73 A b	10,88 A c
75%M 25%PEAD	12,66 A d	14,16 A b	12,98 A b
50%M 50%PEAD	7,28 A g	9,44 A c	7,10 A d
75%M 25%PEBD	15,66 A c	14,46 A b	14,77 A b
50%M 50%PEBD	8,03 A f	7,51 A d	10,85 A c

Médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

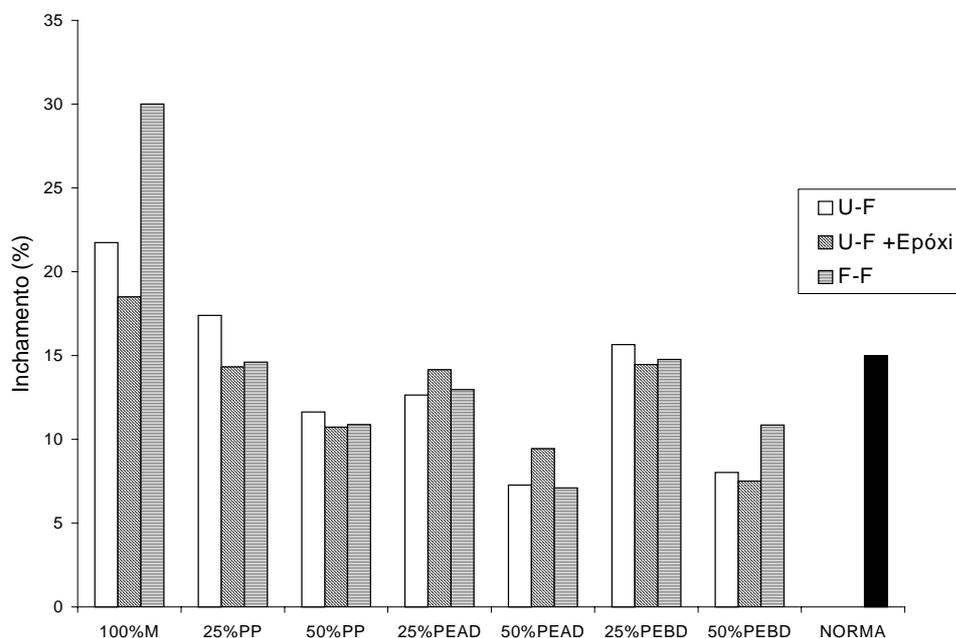


Figura 13 – Valores médios do inchamento em espessura (%) após 24 horas de imersão em água nos diferentes tratamentos e valor máximo estabelecido pela norma DIN 68m761 (1).

5.8. Adsorção de vapor d'água e inchamento em espessura

Quando painéis de madeira aglomerada são produzidos em regiões menos úmidas e são transferidos para regiões com maior porcentagem de umidade, eles sofrem uma pequena alteração no seu peso e inchamento. O teste de absorção de vapor d'água e inchamento em espessura mede, em porcentagem, a variação destes painéis quando ocorre uma mudança no teor de umidade de 65 para 90% a uma temperatura de 20 ± 3 °C.

5.8.1. Adsorção de vapor d'água

A análise de variância (Quadro 12A) indica que a adsorção de vapor d'água, após o equilíbrio, foi afetada pelos tratamentos e que a interação entre a composição das partículas e o tipo de adesivo não foi significativa, sendo, portanto, independentes.

Os valores médios para adsorção de vapor d'água em painéis produzidos com partículas de madeira e madeira/plástico estão nos Quadros 17 e 18 e nas Figuras 14 e 15.

Quadro 17 – Valores médios de adsorção de vapor d'água (%) após equilíbrio a 20 ± 3 °C e 90% de umidade para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função do tipo adesivo

Tipo de Adesivo	
Uréia-formaldeído	0,61 B
Uréia-formaldeído + 0,5% epóxi	0,63 B
Fenol-formaldeído	0,81 A

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

De acordo com o Quadro 17, nota-se que os painéis produzidos com adesivo de fenol-formaldeído adsorveram significativamente maior porcentagem de vapor d'água do que aqueles produzidos com adesivo de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% epóxi.

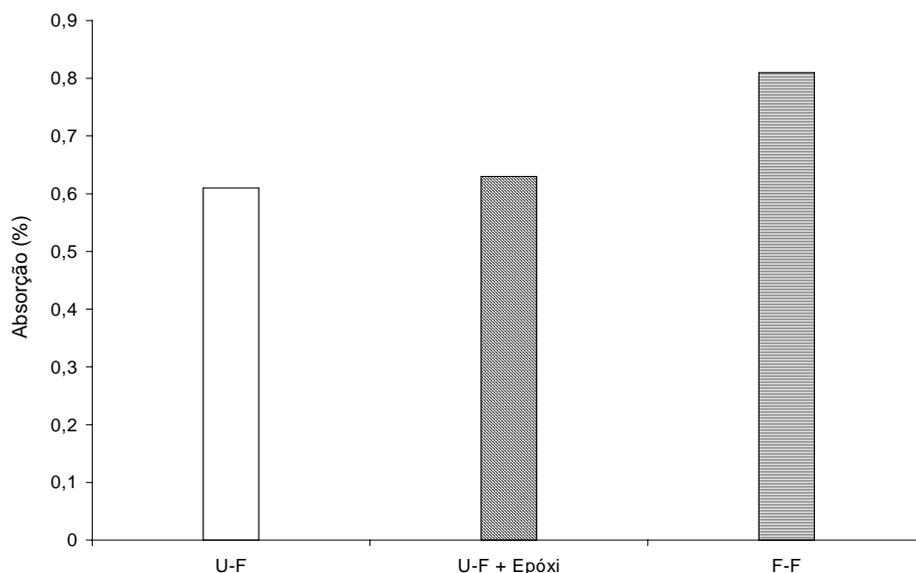


Figura 14 – Valores médios de adsorção de vapor d’água (%) nos diferentes tratamentos após equilíbrio a $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ e 90% de umidade.

Quanto à composição das partículas, verifica-se no Quadro 18 que os painéis produzidos apenas com partículas de madeira adsorvem significativamente maior porcentagem de vapor d’água do que aqueles produzidos com resina termoplástica.

Observa-se ainda (Quadro 18) que os painéis produzidos com 25% de PEBD, após o equilíbrio, adsorveram significativamente menos vapor d’água do que aqueles produzidos com 25% de PP e PEAD.

Para os painéis produzidos com 50% de plástico, verifica-se pelo Quadro 18 que houve diferença significativa entre os três tipos de resinas termoplásticas, ou seja, os painéis produzidos com partículas PEBD adsorveram menor porcentagem de vapor d’água do que aqueles produzidos com partículas de PEAD, que, por sua vez, adsorveram menor porcentagem de vapor d’água do que os painéis produzidos com PP.

Pelo Quadro 18, verifica-se que, de modo geral, não houve diferença significativa devido ao aumento de 25 para 50% no teor de resinas termoplásticas, exceto quando são utilizadas as partículas de PEBD, onde os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas adsorveram menor porcentagem de vapor d’água.

Quadro 18 – Valores médios de adsorção de vapor d'água (%) após equilíbrio a 20 ± 3 °C e 90% de umidade para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas

Composição das Partículas	
100%M	1,11 a
75%M 25%PP	0,74 b
50%M 50%PP	0,72 b
75%M 25%PEAD	0,66 bc
50%M 50%PEAD	0,57 cd
75%M 25%PEBD	0,56 d
50%M 50%PEBD	0,42 e

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

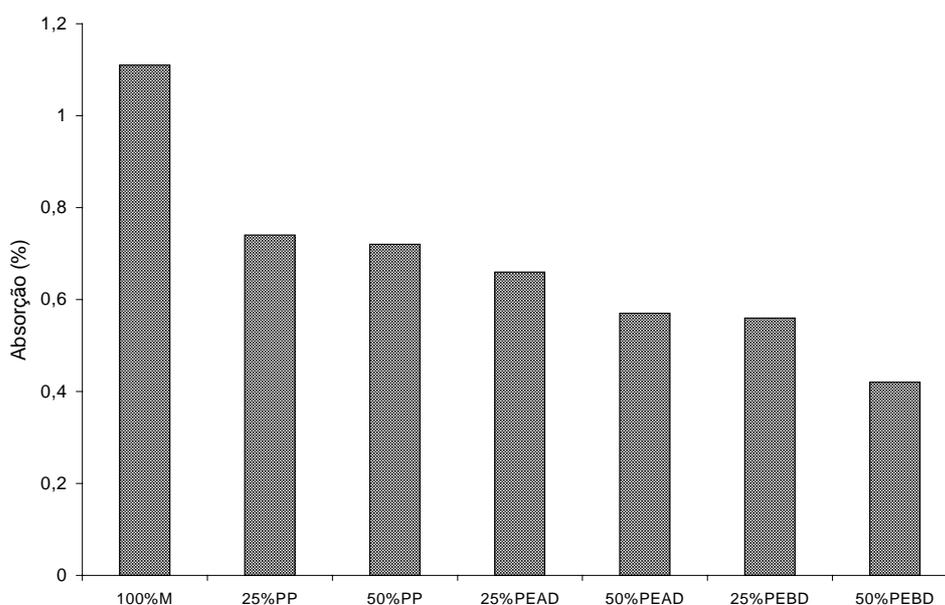


Figura 15 – Valores médios de adsorção de vapor d'água (%) nos diferentes tratamentos após equilíbrio a 20 ± 3 °C e 90% de umidade.

De acordo com os Quadros 17 e 18 e as Figuras 14 e 15, observa-se que os painéis produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, utilizando 50% de PEBD, apresentaram os menores valores de adsorção d'água. Provavelmente, a forma das partículas do PEBD influenciou de forma positiva, diminuindo a porcentagem de adsorção de água, após o equilíbrio.

5.8.2. Inchamento em espessura

A análise de variância (Quadro 13A) indica que o inchamento em espessura, após o equilíbrio a 90% de umidade, foi afetada pelos tratamentos e que a interação entre a composição das partículas e o tipo de adesivo não foi significativa, sendo, portanto, independentes.

Os valores médios para o inchamento em espessura após o equilíbrio a 90% de umidade em painéis produzidos com partículas de madeira e madeira/plástico estão nos Quadros 19 e 20 e nas Figuras 16 e 17.

Quadro 19 – Valores médios do inchamento em espessura (%) após equilíbrio a 20 ± 3 °C e 90% de umidade para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função do tipo adesivo

Tipo de Adesivo	
Uréia-formaldeído	5,16 B
Uréia-formaldeído + 0,5% Epóxi	4,99 B
Fenol-formaldeído	7,09 A

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

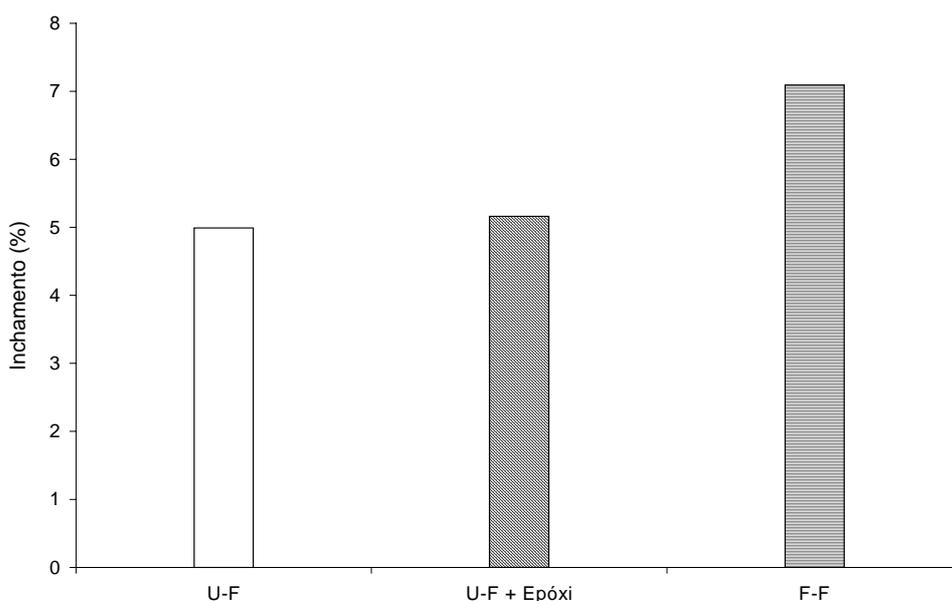


Figura 16 – Valores médios do inchamento em espessura (%) nos diferentes tratamentos após equilíbrio a 20 ± 3 °C e 90% de umidade.

Verifica-se, pelo Quadro 19, que os painéis produzidos com o adesivo de fenol-formaldeído incham mais significativamente do que aqueles produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% epóxi.

Quadro 20 – Valores médios do inchamento em espessura (%) após equilíbrio a 20 ± 3 °C e 90% de umidade para painéis de partículas de madeira e madeira/plástico, em função da composição das partículas

Composição das Partículas	
100%M	7,25 a
75%M 25%PP	6,35 ab
50%M 50%PP	5,73 bc
75%M 25%PEAD	6,27 ab
50%M 50%PEAD	4,65 c
75%M 25%PEBD	5,46 bc
50%M 50%PEBD	4,52 c

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

M = madeira; PP = resina termoplástica de polipropileno; PEAD = resina termoplástica de polietileno de alta densidade; e PEBD = resina termoplástica de polietileno de baixa densidade.

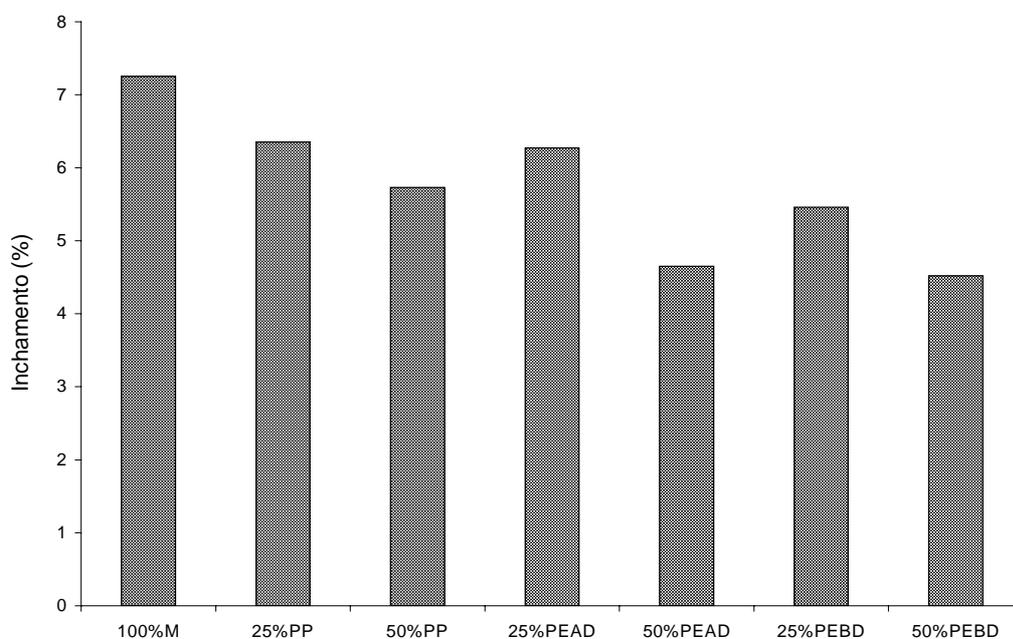


Figura 17 – Valores médios do inchamento em espessura (%) nos diferentes tratamentos após equilíbrio a 20 ± 3 °C e 90% de umidade.

Observa-se, no Quadro 20, que exceto para aqueles contendo 25% de partículas de PP ou PEAD os painéis produzidos apenas com partículas de madeira incharam mais significativamente do que aqueles produzidos com resinas termoplásticas.

Nota-se ainda no Quadro 20 que não houve diferença significativa entre painéis produzidos com 25 ou 50% de resinas termoplásticas.

Apesar de não existir diferença significativa com o aumento no teor de resinas termoplásticas, verifica-se, no Quadro 20, que os painéis com 50% de plástico apresentaram menores valores médios de inchamento em espessura do que aqueles produzidos com 25% de resinas termoplásticas.

De acordo com os Quadros 19 e 20 e as Figuras 16 e 17, observa-se que os painéis produzidos com adesivo de uréia-formaldeído ou uréia-formaldeído + 0,5% epóxi, contendo 50% de PEBD, apresentaram os menores valores médios de inchamento. Provavelmente, a geometria das partículas do PEBD, aliada ao caráter hidrofóbico do plástico, afetou os painéis, ocasionando o seu menor inchamento.

5.9. Expansão linear

Segundo SANTANA e PASTORE (1981), a estabilidade dimensional é uma das mais importantes propriedades dos painéis colados de madeira, dada à necessidade de se manter, no mínimo possível, as variações dimensionais desse material em praticamente todas as suas aplicações.

LEHMANN (1970) concluiu que o teor de resina e a densidade da chapa não têm nenhum efeito sobre a expansão linear para o teste de umidade relativa, variando de 30 a 90%; no entanto o teor de resina e a densidade do painel afetaram a expansão linear no teste de imersão sobre vácuo e pressão.

A norma ANSI/A1-280/93 estabelece que os painéis de madeira aglomerada devem expandir, no máximo, 0,35%.

O valor médio do teste de expansão linear determinado nos painéis é de 0,05%. De acordo com a análise de variância (Quadro 14A), em nível de 5% de probabilidade pelo teste F, não se observa diferença significativa entre os tratamentos, podendo-se concluir que a expansão linear não afeta as propriedades finais dos painéis quando submetidos à temperatura de 20 ± 3 °C e 90% de umidade de equilíbrio.

6. CONCLUSÕES

Foi evidenciada a possibilidade da fabricação de painéis de média densidade, misturando partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com partículas de resinas termoplásticas dos tipos PP, PEAD e PEBD, utilizando os adesivos de uréia-formaldeído, uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi ou fenol-formaldeído, como agentes de ligação.

À exceção do módulo de elasticidade, os valores experimentais das propriedades mecânicas ultrapassaram os valores mínimos requeridos pela norma ANSI/A1-280/93.

Já para o inchamento em espessura, observou-se que, de modo geral, os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas não ultrapassaram o valor máximo estabelecido pela norma DIN 68m761 (1), no entanto para o inchamento em espessura após 24 horas de imersão verificou-se que alguns painéis contendo 25% de resinas termoplásticas também não superaram o valor máximo estabelecido pela norma.

Para absorção de água, observou-se que a maioria dos painéis com 50% de resinas termoplásticas do tipo polietileno, contendo os adesivos de uréia-formaldeído ou uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, não ultrapassaram o valor máximo estabelecido pela norma CSA 0437-1993, no entanto para absorção de água após 24 horas de imersão verificou-se que todos os painéis ultrapassaram o valor máximo estabelecido pela norma.

Os tipos de adesivos empregados na produção dos painéis, de modo geral, não afetaram as propriedades mecânicas, no entanto a adição de 0,5% de epóxi no adesivo de uréia-formaldeído aumentou significativamente a resistência dos painéis produzidos com PP, para os testes de resistência à flexão estática.

Observou-se também que os painéis produzidos com o adesivo de fenol-formaldeído absorveram significativamente maior porcentagem de água do que aqueles produzidos com os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi.

Comparando os diferentes tipos de resinas termoplásticas, verificou-se que, de modo geral, o PEAD apresentou maior resistência para tração perpendicular, arrancamento de parafuso e resistência à flexão estática, entretanto para a dureza Janka os painéis produzidos com 50% de PP, contendo os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, apresentaram resistência significativamente superior à dos painéis produzidos com PEAD e PEBD.

Verificou-se, ainda, que a maioria dos painéis contendo PEAD apresentaram os menores valores médios de inchamento em espessura e absorção de água.

Os painéis produzidos com 50% de resinas termoplásticas apresentaram menores porcentagens de umidade, inchamento em espessura e absorção de água do que aqueles fabricados com 25% de resinas termoplásticas, no entanto o acréscimo de 25 para 50% no teor de plástico diminuiu a resistência dos painéis para tração perpendicular, arrancamento de parafuso e resistência à flexão estática. Já para a dureza Janka, observou-se que os painéis com PP, contendo os adesivos de uréia-formaldeído e uréia-formaldeído + 0,5% de epóxi, tiveram aumento na resistência.

Para os painéis produzidos com partículas de madeira pura, verificou-se que a absorção de água e o inchamento em espessura foram maiores que os dos painéis produzidos com resinas termoplásticas. Já para o teste de resistência à flexão estática, observou-se que painéis produzidos apenas com partículas de madeira apresentaram maior resistência, independentemente do tipo de adesivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Mat-formed wood particleboard:** specification ANSI/A 208.1.1993. Gaithersburg: National Particleboards Association, 1993. 9 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panels:** ASTM D 1037-91. Philadelphia: ASTM, v.04.09, 1991. (Annual Book of ASTM Standards).

BRITO, E. O. **A viabilidade de utilização de espécies de *Pinus* para a produção de chapas de composição estruturais “waferboard”.** Curitiba,, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.1984, 104 p. (Tese de Mestrado).

CARNEIRO, A. C. O. **Efeito da sulfitação dos taninos de *E. grandis* e *E. pellita* para produção de chapas de flocos.** Viçosa: UFV, 2002. 90 p. (Tese de Mestrado).

CARNOS, B. **Madeira aglomerada:** conceito e utilização. SAGRA, 1988. 118 p.

CEMPRE. Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: 8 jul. 2004.

CHOW, P. Properties of medium-density, dry-formed fiberboard from seven hardwood residues and bark. **Forest Products Journal**, v. 26, n. 5, p. 48-55, 1976.

CLEMONS, C. Plastic-wood composites in the united states. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 611, p. 10-18, 2002.

COUTINHO, F. M. B.; COSTA, T. H. S.; CARVALHO, D. L.; GORELOVA, M. M.; SANTA MARIA, L. C. Thermal Behaviour of Modified Wood Fibers. **Polymer Testing**, v. 17, p. 299-310, 1998.

CSA: Canadian Standards Association. OSB an Waferboard. Ontario: CSA 0437– 93, 1993. 18 p.

ELEOTÉRIO, J. R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2000. 120 p. (Tese de Mestrado).

FAO. **Tableros de fibra y tableros de Madeira aglomerada**. Roma. FAO, 1959. 212 p.

FOREST PRODUCT LABORATORY. Wood Handbook: wood as engineering material. Washington: USDA/FS, 1987. 466 p. (Agriculture Handbook, 72)

GONZALES, G.; CLEMONS, C.; MYERS, G. F, HARTEN, T. M. Effects of several ingredient variables on mechanical properties of wood fiber-polyolefin composites blend in a thermokinetic mixer. **Mat. Res. Soc. Symp. Proc.**, n. 266, p. 127, 1992.

HEEBINK, B. G.; LEHMANN, W. F.; HEFTY, F. V. **Reducing particleboard pressing time: exploratory study**. F.P.L. 180, Madison: 1972. 13 p.

HSE, C. Y. Formulation of an economical fast-cure phenolic resina for exterior hardwood flakeboard. In: **Nineth Particleboard Proceedings**, Pullman: Washington State University, 1975. 145 p.

IWAKIRI, S. **influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus**. Curitiba, 1989. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná (Tese de Doutorado).

KARMAKER, A. C.; YOUNGQUIST, J. A. Injection molding of polypropylene reinforced with short jute fibers. **Journal of Polymer Science**, v. 62, p. 1147-1151, 1996.

KELLY, M. W. Critical literature review of relationships between processing parameters and phisical properties of particleboard. **USDA, Forest Service, General Technical Reports, FPL**, v. 10, 1977, 65 p.

KRISHNAN, M.; NARAYAN, R. Compatibilization of biomass fiber with hydrophobic materials. **Mat. Res. Soc. Symp. Proc.**, v. 266, 1992. 93 p.

KRZYSIK, M. A.; YOUNGQUIST, J. A.; MYERS, G. E.; CHAHYADI, I. S.; KOLOSICK, P. C. Wood-polymer bonding in extruded and nonwoven web composite panels. In: SYMPOSIUM. 1991, Madison, WI. **Proceedings...** Madison, WI: Forest Products Research Society: 1991. p. 183-189.

LEHMANN, W. F. Resin efficiency in particleboards as influenced by density, atomization and resin content. **Forest Products Journal**, v. 20, n. 11, p. 48-54, 1970.

MACIEL, A. S. **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de *Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis* em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato**. Viçosa: UFV, 2001. 116 p. (Tese de Doutorado).

MALONEY, T. M. **Modern Particleboard and Dry-Process Fiberboard Manufacturing**. San Francisco, Miller Freeman Publications, 672 p. 1977.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard e dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman, 1989. 672 p.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 682 p.

MATOS, J. L. M. **Ciclo de prensa em chapas de partículas estruturais “Waferboards”**. Curitiba: UFPR, 1988. 163 p. Dissertação (Tese de Mestrado).

MENDES, L. M. ***Pinus* spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)**. Curitiba: UFPR, 2001. 181 p. (Tese de Doutorado).

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. Carbandale: Southern Illinois University Press, 1974, v. 1. 243 p.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcell Dekker, 1994. 680 p.

RECICLÁVEIS. Disponível em: <www.reciclaveis.com.br>. Acesso em: 8 jul. 2004.

RIZZINI, C. T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil** – Manual de Dendrologia brasileira. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1978. 304 p.

SANTANA, M. A. E.; PASTORE J. F. **Adesivo de tanino-formaldeído para aglomerados**. Brasília. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, 1981. (Série técnica, 2)

SILVA, J. C. **Aglomerado: características, propriedades e usos**. Curitiba: UFPR, 2000. 50 p. (Monografia como parte das disciplinas do curso de Engenharia Florestal).

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. Curitiba: UFPR, 2002. 160 p. (Tese de Doutorado).

SILVA, J. C. O eucalipto e suas origens. **Revista da Madeira**. Curitiba-PR, P10-12, 2001. (Edição especial – Eucalipto a madeira do futuro).

SJOSTROM, F. **Wood chemistry: fundamentals and application**. New York: Academic Press, 1993, 223 p.

TEIXEIRA, D.E.; MOREIRA, J. M. M. A. P. Confecção de composto de madeira-plástico utilizando resíduos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e polietileno de baixa densidade (PEBD). **Revista Floresta e Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 72-80, 2002.

USP. Disponível em: <www.usp.br>. Acesso em: 12 abr. 2003.

VILHENA, T. **Aspectos econômicos da recuperação de plásticos no Brasil**. Rio de Janeiro: UFRJ/IMA, 1993. (Tese de mestrado).

VITAL, B. R.; KANAREK, P. H. Parameters affecting dimensional stability of flakeboard and particleboard. **Forest Products Journal**, v. 30, n. 12, p. 23-9, 1980.

VITAL, B. R.; LEHMANN, W. F.; BOONE, R. S. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. **Forest Products Journal**, v. 24, n. 12, p. 37-45, 1974.

WASSERMANN, A. L. "Análise da Processabilidade na Reciclagem de Plásticos Misturados", SULMAT 2002.

WIGOTSKY, V. Alloys and blends home in on demanding design specs. **Plastic Engineering**, v. 11, p. 25-32, 1988.

WILSON, J. B.; KRAHMER, R. L. Particleboard: microscopic observations of resin distribution and board fracture. **Forest Products Journal**, v. 26, n. 11, p. 42-45, 1976.

APÊNDICE A

Quadro 1A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para a densidade

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	0,1438755E-03	0,7193776E-04	0,45ns
Tipos de Partículas(TP)	6	0,8608915E-03	0,1434819E-03	0,89ns
Interação TA X TP	12	0,2335418E-02	0,1946182E-03	1,21ns
Tratamentos	20	0,3340185E-02	0,1670093E-03	1,03
Resíduo	21	0,3388825E-02	0,1613726E-03	
Total	41	0,6729011E-02		
CV (%) = 1,7209				

Quadro 2A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para a umidade

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	2,231050	1,115525	29,17*
Tipos de Partículas(TP)	6	89,65039	14,94173	390,70*
Interação TA X TP	12	1,312307	0,1093589	2,86*
Tratamentos	20	93,19375	4,659687	121,84
Resíduo	21	0,8031167	0,3824365E-01	
Total	41	93,99686		
CV (%) = 3,2493				

Quadro 3A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para tração perpendicular

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	28,89488	14,44744	9,17*
Tipos de Partículas(TP)	6	216,8060	36,13433	22,93*
Interação TA X TP	12	68,51566	5,709638	3,62*
Tratamentos	20	314,2165	15,71083	9,97
Resíduo	21	33,09120	1,575771	
Total	41	347,3077		
CV (%) = 17,647				

Quadro 4A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para o arrancamento de parafuso

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	46,37762	23,18881	0,41ns
Tipos de Partículas(TP)	6	3921,271	653,5452	11,67*
Interação TA X TP	12	1364,796	113,7330	2,03ns
Tratamentos	20	5332,445	266,6222	4,76
Resíduo	21	1175,625	55,98214	
Total	41	6508,070		
CV (%) = 5,4842				

Quadro 5A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para dureza Janka

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	11722,09	5861,044	9,21*
Tipos de Partículas(TP)	6	67122,64	11187,11	17,59*
Interação TA X TP	12	109515,2	9126,267	14,35*
Tratamentos	20	188359,9	9417,997	14,80
Resíduo	21	13359,03	636,1442	
Total	41	201719,0		
CV (%) = 5,0587				

Quadro 6A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para o módulo de ruptura

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	1183,690	591,8450	7,97*
Tipos de Partículas(TP)	6	8299,627	1383,271	18,64*
Interação TA X TP	12	3109,068	259,0890	3,49*
Tratamentos	20	12592,39	629,6193	8,48
Resíduo	21	1558,520	74,21524	
Total	41	14150,91		
CV (%) = 5,4896				

Quadro 7A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para o módulo de elasticidade

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	6134205,00	3067102,00	2,21*
Tipos de Partículas(TP)	6	0,2340933E+09	0,3901555E+08	28,15*
Interação TA X TP	12	0,7540723E+08	6283936,00	4,53*
Tratamentos	20	0,3156348E+09	0,1578174E+08	11,39
Resíduo	21	0,2910673E+08	1386035,00	
Total	41	0,3447415E+09		
CV (%) = 6,5012				

Quadro 8A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para a absorção de água após 2 horas de imersão

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	12851,17	6425,587	2410,55*
Tipos de Partículas(TP)	6	978,4358	163,0726	61,18*
Interação TA X TP	12	449,4979	37,45816	14,05*
Tratamentos	20	14279,11	713,9554	267,84
Resíduo	21	55,97786	2,665612	
Total	41	14335,09		
Cv (%) = 6,7497				

Quadro 9A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para a absorção de água após 24 horas de imersão

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	11717,65	5858,825	473,00*
Tipos de Partículas(TP)	6	3617,177	602,8628	48,67*
Interação TA X TP	12	355,1166	29,59305	2,39*
Tratamentos	20	15689,94	784,4972	63,33
Resíduo	21	260,1196	12,38665	
Total	41	15950,06		
CV (%) = 8,8615				

Quadro 10A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para o inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	189,1825	94,59127	97,55*
Tipos de Partículas(TP)	6	192,8666	32,14443	33,15*
Interação TA X TP	12	153,7101	12,80918	13,21*
Tratamentos	20	535,7593	26,78796	27,63
Resíduo	21	20,36295	0,9696645	
Total	41	556,1222		
CV (%) = 12,221				

Quadro 11A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para o inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	20,99840	10,49920	7,73*
Tipos de Partículas(TP)	6	979,8688	163,3115	120,23*
Interação TA X TP	12	156,5444	13,04536	9,60*
Tratamentos	20	1157,412	57,87058	42,60
Resíduo	21	28,52575	1,358369	
Total	41	1185,937		
CV (%) = 8,5951				

Quadro 12A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para a absorção de vapor d'água após o equilíbrio à temperatura de 20 ± 3 °C e 90% de umidade

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	0,3162903	0,1581452	72,38*
Tipos de Partículas(TP)	6	1,702627	0,2837712	129,88*
Interação TA X TP	12	0,4090591E-01	0,3408826E-02	1,56ns
Tratamentos	20	2,059824	0,1029912	47,14
Resíduo	21	0,4588390E-01	0,2184948E-02	
Total	41	2,105707		
CV (%) = 6,7881				

Quadro 13A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para o inchamento em espessura após o equilíbrio à temperatura de 20 ± 3 °C e 90% de umidade

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	38,16633	19,08317	33,68*
Tipos de Partículas(TP)	6	34,11056	5,685094	10,04*
Interação TA X TP	12	12,26362	1,021969	1,80ns
Tratamentos	20	84,54052	4,227026	7,46
Resíduo	21	11,89705	0,5665261	
Total	41	96,43757		
CV (%) = 13,085				

Quadro 14A – Resumo da análise de variância (ANOVA) e teste F para a expansão linear

FV	GL	SQ	QM	F
Tipos de Adesivo (TA)	2	0,2500236E-02	0,1250118E-02	1,02ns
Tipos de Partículas(TP)	6	0,6556023E-02	0,1092671E-02	0,89ns
Interação TA X TP	12	0,7559775E-02	0,6299812E-03	0,51ns
Tratamentos	20	0,1661603E-01	0,8308017E-03	0,68
Resíduo	21	0,2579499E-01	0,1228333E-02	
Total	41	0,4241102E-01		
Cv (%) = 65,446				

FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma de quadrado; QM = quadrado médio; TA = tipos de adesivos; TP = tipos de partículas; CV = coeficiente de variação; * = significativo a 5% de probabilidade; e ns = não-significativo.