

FERNANDO VITOR DE OLIVEIRA

**COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*,
POLIETILENO E EMBALAGENS CARTONADAS**

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
2005

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

T

O48c
2006

Oliveira, Fernando Vitor de, 1980-
Compósitos de partículas de madeira de
Eucalyptus grandis, polietileno e embalagens cartonadas
/ Fernando Vitor de Oliveira. – Viçosa : UFV, 2006.
xi, 71f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

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

Referências bibliográficas: f. 61-65.

1. Madeira - Produtos. 2. Materiais compostos -
Análise. 3. Chapas de madeira. 4. Madeira - Química.
5. Embalagens de papelão. 6. Compósitos poliméricos.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD. 634.98322

FERNANDO VITOR DE OLIVEIRA

**COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*,
POLIETILENO E EMBALAGENS CARTONADAS**

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: 29 de Julho de 2005

Prof. Alexandre Santos Pimenta
(Conselheiro)

Prof. José de Castro Silva
(Conselheiro)

Prof. Carlos Pedro Boechat Soares

Prof. Luciano José Minette

Prof. Benedito Rocha Vital
(Orientador)

Aos meus familiares:

minha irmã Karina,

meus irmãos Rodrigo e Marcelo e,

em especial, à minha mãe, Mariza Ferreira Vitor.

À Carol.

“Nenhum de nós é tão bom quanto todos nós juntos...”

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por tudo.

Aos meus familiares.

À Carol e a todos os meus amigos, em especial aos engenheiros florestais Rodrigo Nascimento, Miguel Umbelino, Frederico Vieira, Patrícia Padron e Luis Guilherme Miranda .

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal.

Ao professor Benedito Rocha Vital, pela seriedade e confiança depositada.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

Aos conselheiros Alexandre Santos Pimenta e José de Castro Silva.

Aos professores Carlos Pedro Boechat Soares e Luciano José Minette.

Aos pós-graduandos, bolsistas e estagiários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira da UFV, Carla, Cassinha, Graziela, Gilson, Pedro, Carlos e Andréia.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, “Maninho”, Hésio, Aristeu e Cida.

E ao povo brasileiro, que financiou meus estudos.

BIOGRAFIA

Fernando Vitor de Oliveira, filho de Renato Cota de Oliveira e Mariza Ferreira Vitor, nasceu no dia 4 de fevereiro de 1980, em Belo Horizonte-MG.

Cursou o ensino básico na Escola Municipal José Maria Alkmim; o ensino fundamental, na Escola Estadual Três Poderes; e o ensino médio, na Escola Politécnica de Minas Gerais, em Belo Horizonte-MG.

Em março de 1999, iniciou o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, colando grau em 1^o de agosto de 2003. No mesmo ano, iniciou o curso de Mestrado em Ciência Florestal, na área de Tecnologia da Madeira, pela Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de Mestre em julho de 2005.

ÍNDICE

| | Página |
|--|--------|
| RESUMO | viii |
| ABSTRACT..... | x |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 5 |
| 2.1. Chapas de madeira reconstituída..... | 5 |
| 2.1.1. Aglomerado..... | 8 |
| 2.1.2. Acetilação da Madeira..... | 11 |
| 2.2. Termoplásticos..... | 15 |
| 2.2.1. Polietileno de baixa e de alta densidade (PEBD e PEAD) .. | 17 |
| 2.2.2. Reciclagem de polímeros plásticos..... | 18 |
| 2.3. Embalagens cartonadas..... | 20 |
| 2.4. Compósitos com madeira..... | 22 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 26 |
| 3.1. Caracterização do material utilizado..... | 26 |
| 3.2. Preparação das partículas de madeira..... | 27 |
| 3.3. Preparação das partículas de plástico..... | 27 |
| 3.4. Preparação das partículas de embalagens cartonadas..... | 28 |
| 3.5. Preparo e prensagem dos compósitos..... | 28 |
| 3.6. Confeção dos corpos-de-prova..... | 28 |
| 3.7. Delineamento experimental..... | 31 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 32 |
| 4.1. Densidade..... | 32 |
| 4.2. Umidade de equilíbrio higroscópico – UEH..... | 33 |
| 4.3. Módulo de ruptura – MOR..... | 34 |
| 4.4. Módulo de elasticidade – MOE..... | 37 |
| 4.5. Tração perpendicular..... | 38 |

| | |
|---|----|
| 4.6. Arrancamento de parafuso | 40 |
| 4.7. Dureza Janka | 42 |
| 4.8. Compressão longitudinal | 44 |
| 4.9. Adsorção de umidade – 90% UR e 20 °C temperatura | 45 |
| 4.10. Absorção de água – 2 horas de imersão..... | 47 |
| 4.11. Absorção de água – 24 horas de imersão..... | 48 |
| 4.12. Inchamento em espessura - 90% UR e 20 °C temperatura..... | 50 |
| 4.13. Inchamento em espessura – 2 horas de imersão..... | 51 |
| 4.14. Inchamento em espessura – 24 horas de imersão..... | 53 |
| 4.15. Expansão linear - 90% UR e 20 °C temperatura | 54 |
| 4.16. Expansão linear – 2 horas de imersão | 56 |
| 4.17. Expansão linear – 24 horas de imersão | 57 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 59 |
| REFERÊNCIAS | 61 |
| APÊNDICE A | 66 |

RESUMO

OLIVEIRA, Fernando Vitor, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2005. **Compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polietileno e embalagens cartonadas**. Orientador: Benedito Rocha Vital. Conselheiros: Alexandre Santos Pimenta e José de Castro Silva.

Os objetivos deste trabalho foram produzir e avaliar as propriedades de compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, acetiladas e não-acetiladas, combinadas com partículas de polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD) e embalagens cartonadas, pelo método de termocompressão. Os compósitos foram produzidos no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LPEM/UFV, nas dimensões de 40 x 40 x 1 cm e com densidade de 0,70 g cm⁻³. A massa de partículas recebeu 0,5% de parafina e 8% de adesivo fenol-formaldeído, por meio de uma pistola pneumática inserida em um tambor rotatório. Após a aplicação da parafina e do adesivo prepara-se manualmente, o colchão (distribuição das partículas) e, em seguida, os compósitos foram prensados por 8 minutos a 170 °C. O experimento constituiu-se de 14 tratamentos, sendo sete composições de partículas (100% madeira e madeira combinada com 20 e 40% de PEBD, PEAD e embalagens cartonadas), dois tipos de partículas: acetiladas, que passaram por tratamento com anidrido acético, e não-acetiladas, que não passaram por tratamento algum, com quatro repetições, constituindo um total

de 56 chapas. Todos os corpos-de-prova foram condicionados em câmara climática (65% UR e temperatura de 20 °C), para realização dos testes físicos e mecânicos, conforme norma *American Society for Testing and Materials - ASTM 1037-91*. Foram determinados: densidade, umidade de equilíbrio, módulo de ruptura - MOR, módulo de elasticidade - MOE, tração perpendicular, arrancamento de parafuso, dureza janka, compressão longitudinal, absorção de água (AA90%, AA2h, e AA24h), inchamento em espessura (IE90%, IE2h e IE24h) e expansão linear (EL90%, EL2h e EL24h), em três condições: alteração da umidade relativa de 65 para 90%, 2 e 24 horas de imersão em água. Todos os tratamentos foram submetidos à análise estatística, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. A adição de embalagens cartonadas reduziu todas as propriedades mecânicas e promoveu maior absorção de água, inchamento em espessura e expansão linear, independentemente de as partículas serem acetiladas ou não, resultando em compósitos com baixa estabilidade dimensional. A adição de plástico reduziu as propriedades mecânicas, em especial a flexão estática (MOR e MOE). Em relação aos testes físicos, a adição de plástico, principalmente PEAD na maior proporção (40%), apresentou compósitos mais estáveis, independentemente do tipo de partícula. O tratamento de acetilação promoveu significativa estabilização dos painéis na maioria dos testes de estabilidade dimensional, entretanto verificou-se também que a acetilação reduziu algumas propriedades mecânicas. O PEAD apresentou-se como a melhor matéria-prima, dentre as estudadas, para produção de compósitos de madeira e plástico, enquanto a utilização de embalagens cartonadas resultou nas menores médias. Entretanto, é importante ressaltar que apesar de apresentar baixa resistência mecânica e elevada instabilidade, os compósitos contendo embalagens cartonadas devem ser mais estudados.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Fernando Vitor, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2005.
Composites of particles of wood of *Eucalyptus grandis*, polyethylene and paperboard packs. Adviser: Benedito Vital Rocha. Committee Members: Alexandre Santos Pimenta and José de Castro Silva.

The objective of this work was to produce and to evaluate the properties of composites of particles of wood of *Eucalyptus grandis*, acetylated and non acetylated, combined with particles of polyethylene of low density (PEBD), polyethylene of high density (PEAD) and paperboard, by the thermal compression method. The composites were produced in the Laboratory of Panels and Energy of Wood - LPEM/UFV, in the dimensions of 40 x 40 x 1 cm and with density of 0,70 g cm⁻³. The mass of particles received 0,5% of paraffin and 8% of phenol-formaldehyde adhesive, by means of pneumatic pistol inserted in a tumbling barrel. After these treatments, the particle distribution is manually done and the composites were pressed for 8 minutes at 170 °C. The experiment was constituted of 14 treatments and 7 compositions of particles (100% wood, and wood combined with 20% and 40% of PEBD, PEAD and paperboard), two types of particles, acetylated, that was treated with acetic anhydride, and non acetylated, that were not treated, with 4 repetitions, constituting a total of 56 particleboards. All the particleboards were conditioned in a climatic chamber (65% RU and temperature of 20 °C) for the

accomplishment of the physical and mechanical tests, according to the rules of the American Society for Testing and Materials - ASTM 1037-91. The following parameters were determined: Density, moisture of balance, modulus of rupture-MOR, modulus of elasticity-MOE, perpendicular traction (TP), screw pulling (AP), Janka hardness (DJ), longitudinal compression (CL), water absorption (AA90%, AA2h, and AA25h), thickness swelling (IE90%, IE2h, and IE24h) and lineal expansion (EL90%, EL2h, and EL24h), in three conditions: change of relative moisture from 65 to 90%, 2 and 24 hours of immersion in water. All the treatments were submitted to statistical analyses, by the Tukey test at 5% probability. The addition of paperboard reduced all the mechanical properties and promoted a greater absorption of water, thickness swelling and linear expansion, whether or not acetylated, resulting in composites with low dimensional stability. The addition of plastic reduced the mechanical properties, specially the static bending (MOR and MOE). In relation to the physical tests the addition of plastic, mainly PEAD in the greater amount (40%), showed most stable composites, not depending of the particle type. The acetylation treatment promoted a significant stabilization of the particleboards in the majority of the tests of dimensional stability but it also was verified that the acetylation reduced some mechanical properties. The PEAD showed to be the best raw material among the studied ones, for the production of composites of wood and plastic, while the use of paperboard packs resulted in the smaller averages. But it is important to point out that, in spite of showing a low mechanical resistance and a high instability, the composites containing paperboard packs should be further studied.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos materiais que a natureza coloca à disposição da humanidade, a madeira se tem se destacado desde o início da civilização, e provavelmente será um material ainda demandado por bastante tempo. Atualmente, ela é utilizada de variadas formas: desde finalidades que não requerem muito beneficiamento, como mourões e estacas, até produtos altamente processados, como a produção de painéis reconstituídos, produção de pasta celulósica, dentre outras.

A demanda pela madeira aumenta a pressão sobre as florestas naturais, o que acarreta a necessidade de se encontrar formas mais adequadas de utilização dessa matéria-prima, que possibilitem o amplo aproveitamento de todo material, minimizando a geração de resíduos.

Painéis de madeira reconstituída são produtos elaborados a partir de madeira laminada e, ou, fragmentada, como compensado que utiliza lâminas, OSB (*Oriented Strand Board*) que utiliza flocos, aglomerado que utiliza partículas, entre outros. O OSB e, principalmente, o aglomerado podem ser produzidos a partir de resíduos da colheita e do beneficiamento da madeira.

Chapas de partículas de madeira aglomerada são produtos elaborados pela mistura de pequenos fragmentos de materiais lignocelulósicos, geralmente madeira, aglutinados com adesivos sintéticos, ou outro aglomerante, sendo o conjunto termoprensado por tempo suficiente para que ocorra a cura da resina, em geral uréia ou fenol-formaldeído.

A indústria de chapas de partículas teve origem na Alemanha, durante a Segunda Guerra Mundial. A primeira fábrica de aglomerado surgiu em 1941, no entanto, em escala mundial, esse painel desenvolveu-se a partir da década de 1950, mais notadamente na de 1960. No Brasil só começou a ser produzido em 1966. As oito grandes produtoras de aglomerado no País, localizadas na região centro-sul, representam 2% da produção mundial, basicamente voltado para a indústria moveleira, o que deixa o Brasil como nono maior produtor; os principais produtores mundiais de chapa aglomerada são os Estados Unidos, com 25%, seguidos pela Alemanha e Canadá, com 12% (BNDES, 2002).

Compósito é um material constituído de dois ou mais componentes distintos, cuja associação confere ao conjunto propriedades que isoladamente não possuem. A produção de painéis de madeira com polímeros é uma prática relativamente antiga quanto ao uso de resinas termofixas, como uréia, fenol, melamina-formaldeído e isocianatos, na produção do aglomerado (CORREA et al., 2003).

Compósitos produzidos a partir de resinas naturais, combinadas com madeira, datam de antes de 1900. Entretanto, a denominação “compósitos” é mais adequada quando se refere a materiais multifásicos, cujo produto reflita as propriedades das matérias-primas que lhes deram origem, como os compósitos de madeira combinados com termoplásticos. Esses compósitos são mais recentes e começaram a ser fabricados no Japão e, principalmente, nos Estados Unidos, onde são denominados de *Wood Plastic Composite – WPC*.

Em 2002, o Brasil produziu quase 4 milhões de toneladas de plásticos. A maior parte das resinas termoplásticas no Brasil é destinada à indústria de embalagens. Estes produtos são derivados da indústria petroquímica e, após o uso, são descartados. Por não serem biodegradáveis, tornam-se um grande problema ambiental, podendo persistir no ambiente por 450 anos (CEMPRE, 2004).

Outro resíduo encontrado em grande quantidade no lixo brasileiro são as embalagens cartonadas (também conhecidas como longa vida ou multicamadas, ou ainda, embalagens “tetra pak”, referência à empresa fabricante), compostas de polietileno de baixa densidade (PEBD), papelão e alumínio.

Uma das possíveis utilizações desses resíduos plásticos e de embalagens cartonadas é a produção de compósitos com partículas de madeira, como

os painéis de aglomerado. Devido às características físicas e mecânicas, algumas resinas termoplásticas, como polietileno de baixa e de alta densidade (PEBD e PEAD), destacam-se com potencial para ser associado às partículas de madeira. O resultado desta combinação é um produto com características próprias, que reflete as propriedades da madeira, do plástico e das embalagens cartonadas, apresentando diversas vantagens.

Além das vantagens do aglomerado tradicional, como eliminação da anisotropia e menor exigência em termo de matéria-prima, podendo inclusive utilizar resíduos florestais, os compósitos produzidos pela combinação de madeira e resíduos plásticos agregam outras vantagens. Entre elas destacam-se o aumento da resistência à umidade e a deterioração ambiental, maior resistência ao ataque de insetos e menor custo de manutenção, quando comparado ao aglomerado de partículas de madeira tradicional (CORREA et al., 2003).

Uma dificuldade técnica a ser superada para o desenvolvimento da indústria de WPC – *wood plastic composites* – é a relação entre a madeira, que apresenta caráter hidrofílico, e o plástico, de caráter hidrofóbico. Essa relação dificulta uma adesão eficiente entre esses materiais, o que torna necessário o estudo de aditivos que possibilitem uma chapa de melhor qualidade (MACIEL, 2001; TEIXEIRA et al., 2002; CORREA et al., 2003). O desenvolvimento de um aditivo que solucione ou atenuie essa incompatibilidade é um obstáculo a ser superado para o desenvolvimento da indústria de compósitos por termocompressão no Brasil e no mundo.

Outras duas possibilidades para melhorar a qualidade dos compósitos, em especial no que se refere à adesão entre as partículas, são os tratamentos nas superfícies dos materiais, como a estabilização dimensional promovida pela acetilação de partículas, ou, ainda, as alterações no processo, como operar com temperaturas de prensagem que promovam derretimento do plástico, acarretando maior interação com a matriz madeireira.

Com a descoberta de tratamentos, processos ou aditivos eficientes e baratos, foi possível produzir compósitos com alta resistência mecânica e boa estabilidade dimensional, o que viabiliza sua utilização, a um custo competitivo, na construção civil (pisos, assoalhos, divisórias etc.). A grande demanda desse segmento, dado o déficit habitacional do País, juntamente com a indústria

moveleira, possibilitaria um grande salto no desenvolvimento de equipamentos para construção e adequação de fábricas de compósitos madeira/plástico e madeira/embalagens cartonadas.

É importante ressaltar que os compósitos produzidos a partir de madeira e resíduos plásticos ou de embalagens cartonadas acompanham a tendência mundial de desenvolvimento sustentável, em que se buscam novos produtos a partir de matéria-prima alternativa, sendo um produto rotulado de “ecologicamente correto”.

Assim sendo, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar as propriedades de compósitos fabricados com partículas de *Eucalyptus grandis*, acetiladas e não-acetiladas, combinadas com partículas de resíduos de polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD) e de embalagens cartonadas, pelo método de termocompressão. Os objetivos específicos foram:

- ◆ Avaliar a influência de diferentes tipos de resíduos termoplásticos (PEBD e PEAD) e de embalagens cartonadas, combinados com madeira, na produção de compósitos.
- ◆ Avaliar a influência de diferentes proporções de partículas de PEBD, PEAD e embalagens cartonadas, combinadas com partículas de madeira, na produção de compósitos.
- ◆ Avaliar a influência de tratamento de acetilação das partículas de madeira, visando melhorar a estabilidade dimensional.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Chapas de madeira reconstituída

Dentre as áreas de conhecimento abrangidas pela Tecnologia da Madeira destaca-se o desenvolvimento, relativamente recente, de painéis a partir de madeira reconstituída, dando origem a produtos conhecidos como compensado, *Oriented Strand Board* (OSB), *Medium Density Fiberboard* (MDF) aglomerado, entre outros.

- **Compensado**

O compensado é um painel obtido com a colagem de lâminas de madeira em número ímpar, com a direção da grã perpendicular entre as camadas adjacentes. Com o advento da Revolução Industrial, houve um grande avanço quanto ao uso da madeira, época em que surgiram as primeiras laminadoras por faqueamento, desenvolvendo a indústria de painéis compensados (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2000).

A fabricação do painel é baseada no princípio da laminação cruzada, pela qual as lâminas adjacentes são coladas de forma a conferir um equilíbrio estrutural através da construção balanceada. Quando lâminas de madeira são coladas obedecendo ao princípio da laminação cruzada, a restrição imposta pela linha de cola ao comportamento individual das lâminas resulta em um

produto com melhor estabilidade dimensional e melhor distribuição da resistência nos sentidos longitudinal e transversal (IWAKIRI, 2003).

- ***Oriented Strand Board – OSB***

Segundo Maloney (1993), OSB é um painel reconstituído de partículas de madeira orientadas, unidas com resina à prova d'água, sob prensagem a quente, sendo um painel com alta resistência mecânica e grande rigidez. As partículas, na forma de flocos, geralmente são de 25 mm de largura por 80-150 mm de comprimento. Os flocos podem estar dispostos, na camada interna, com orientação perpendicular às camadas externas.

Os painéis de flocos orientados são um tipo de aglomerado estrutural, apresentando maior estabilidade dimensional que o aglomerado de partículas. Um dos principais concorrentes, no entanto, é o compensado, que por sua vez é mais estável que o OSB. É um painel que pode ser utilizado em diversas situações onde se utilizam o aglomerado e o compensado. Várias razões explicam a crescente demanda de OSB, e sua participação no mercado aumenta cada vez mais, devido aos baixos custos de produção, aliados ao bom desempenho físico e mecânico do painel.

- ***Medium Density Fiberboard – MDF***

O MDF é um dos tipos de chapas de fibras. As chapas de fibras se caracterizam como um material de estrutura homogênea, utilizando a fibra da madeira de forma individualizada. No País, até 1998, eram produzidas apenas chapas de fibras isolantes e duras. Desde então, com o início da fabricação no Brasil, o mercado desse tipo de painel vem crescendo expressivamente, com a entrada em operação de outras unidades industriais. Atualmente, o MDF é uma importante opção de material de qualidade para a indústria moveleira (IWAKIRI, 2003).

O MDF é produzido através do processo seco. A densidade do painel varia de 0,50 até 0,80 g cm⁻³, sendo os painéis com 0,70 g cm⁻³ os mais comercializados. A espessura varia de 15 a 38 mm. Apresenta diversas vantagens em relação ao aglomerado, como possibilidade de receber acabamento e

ser usinado, melhores propriedades mecânicas e menor inchamento residual (IWAKIRI, 2003).

A utilização da madeira para produção de painéis apresenta muitas vantagens, pois a conversão da tora em flocos ou partículas é muito grande, próximo de 100% no caso do aglomerado, contribuindo para minimizar a geração de resíduos e racionalizando o uso da madeira. Em alguns países, as principais fontes de matérias-primas utilizadas pelas fábricas de aglomerado são de resíduos industriais, os provenientes da colheita e do processamento da madeira, as madeiras de qualidade inferior e as provenientes de desbastes. No Brasil, a principal fonte de matéria-prima são as florestas plantadas, em especial eucalipto e pinus (REMADE, 2000).

A indústria de painéis de madeira reconstituída no Brasil apresenta dois cenários distintos. Poucas empresas operam na produção de chapas de fibras e de aglomerado, em geral de grande porte, operando com alta tecnologia e produtividade; na indústria de compensados predominam as empresas de pequeno porte (ABIPA, 2002).

Apesar de o compensado apresentar uma demanda bastante significativa, nos últimos anos vem perdendo espaço para o aglomerado e, mais recentemente, para o MDF e o OSB. Uma justificativa para a substituição do compensado por outros painéis se baseia nas características desses produtos, que apresentam melhor relação custo/benefício.

Segundo Mendes (2001), o primeiro painel produzido industrialmente no mundo foi o compensado, fato ocorrido no início do século XX, nos Estados Unidos. Os painéis de madeira aglomerada surgiram na Alemanha, no início da década de 1940, como forma de viabilizar a utilização de resíduos de madeira, devido à dificuldade em se obter madeira de qualidade adequada para ser laminada. Ao final da Segunda Guerra, em 1946, ocorreu um processo de desenvolvimento nos Estados Unidos, com o aperfeiçoamento de equipamentos e processos produtivos.

Após o surgimento do compensado, vários outros painéis reconstituídos foram desenvolvidos, assim como adesivos adequados para o processamento desse produto. De acordo com Maciel (2001), na década de 1940 deu-se o desenvolvimento e na de 1960 iniciou-se a expansão maciça, em nível mundial, da indústria de painel aglomerado. A partir da década de 1960 houve grandes

avanços em termos de instalações e processos industriais, que culminaram no desenvolvimento de novos painéis, como o MDF e o OSB, em meados da década de 1970.

Segundo Iwakiri (2003), o desenvolvimento das tecnologias de produção de painéis de madeira reconstituída seguiu a seguinte cronologia:

- 1858 – Lyman, nos Estados Unidos, desenvolve a primeira patente de chapas de fibras;
- 1866 – Fleury, nos Estados Unidos, desenvolve patente para produção de chapas de fibras isolantes pelo processo úmido;
- 1880 – desenvolvimento da tecnologia de produção de chapas de fibras duras pelo processo úmido;
- 1913 – início da produção comercial de compensado;
- 1914 – primeira fábrica de chapas isolantes com base na tecnologia de produção do papelão;
- 1931 – desenvolvimento do desfibrador “Asplund”, na Suécia, com base em altas temperaturas e pressões;
- 1940 – início da produção de compensado no Brasil;
- 1952 – planta piloto para chapas duras pelo processo seco;
- 1955 – início da produção de chapas de fibras no Brasil;
- 1966 – início da produção de painéis de aglomerado no Brasil;
- 1970 – produção dos painéis de fibras de média densidade (MDF);
- 1975 – produção de “*Waferboard*” e OSB no mundo;
- 1997 – início da produção de MDF no Brasil; e
- 2002 – início da produção de OSB no Brasil.

2.1.1. Aglomerado

Aglomerado é um painel produzido com pequenas partículas de madeira, ou outro material lignocelulósico, com a incorporação de adesivo, sendo o conjunto termoprensado por tempo suficiente para que ocorra a cura da resina. Essa concepção de produto elaborado, a partir de pequenos fragmentos, faz com que o aglomerado apresente uma série de vantagens em relação a outros tipos de painéis, como:

- eliminação da anisotropia da madeira.

- eliminação dos defeitos redutores da resistência da madeira, como nós, madeira juvenil etc.;
- possibilidade de manipulação das variáveis de fabricação, como determinar a densidade do painel a ser produzido.
- produto menos exigente em termos de matéria-prima; e
- menor custo de produção em relação ao compensado, em termos de qualidade da matéria-prima e mão-de-obra.

Segundo Maloney (1993), a espécie botânica de madeira a ser utilizada para produção de painéis de madeira reconstituída é uma das variáveis mais importantes do processo e determinante na densidade do painel. A madeira é a principal fonte de matéria-prima para produção de painéis reconstituídos, sendo a densidade a propriedade mais importante, uma vez que interfere em todas as propriedades, físicas e mecânicas dos painéis (MOSLEMI, 1974).

A espécie de madeira afeta a estabilidade dimensional dos painéis. Os painéis produzidos a partir de madeira de maior densidade, em geral, apresenta maior instabilidade dimensional. A maioria das indústrias de painéis reconstituídos, opera com madeiras de densidade entre 0,40 e 0,60 g cm⁻³.

A esbeltez da partícula é a razão entre o comprimento e a espessura, e tem grande influência sobre a área de contato entre os materiais, sobre as propriedades mecânicas e sobre o consumo relativo de adesivo. Diversos estudos mostram que as dimensões das partículas interferem nas propriedades de estabilidade e resistência dos painéis. Segundo Moslemi (1974), a geometria das partículas afeta a resistência das chapas, sua estabilidade dimensional, seu acabamento e sua colagem, pois determina o grau de contato entre as partículas, fator essencial para uma boa adesão.

As diversas propriedades das chapas são afetadas, de forma diferenciada, pelas dimensões das partículas. Pesquisadores observaram que as partículas longas e finas melhoram a estabilidade dimensional. Vital e Wilson (1980), no entanto, verificaram que o efeito da espessura depende do seu comprimento, ou seja, depende da razão comprimento/espessura. Além da geometria, a qualidade das chapas é afetada pela espécie, com possível

ocorrência de interações entre a matéria-prima e o processamento (VITAL; WILSON, 1980).

Avaliando o efeito da geometria de partículas de *E. grandis* para produção de aglomerado, Vital et al. (1992) concluíram que para produzir chapas mais rígidas, com maior resistência e estabilidade, é necessário empregar partículas mais finas. Já para obter maiores valores de resistência à tração perpendicular, é necessário o uso de partículas mais espessas.

O teor de umidade das partículas é uma variável importante no processo de produção de painéis de madeira, influenciando o processo e o produto. Em geral, quanto mais úmidas as partículas, maior o tempo de prensagem, além de elas afetarem negativamente o processo de cura do adesivo. Outra consequência de se utilizar partículas com umidade elevada é a formação de vapor d'água, o que ocasiona graves defeitos nos painéis.

Segundo Moslemi (1974), partículas com maior teor de umidade facilitam o processo de compactação do painel, reduzindo a pressão necessária para atingir a espessura desejada durante a prensagem, devido à plasticização da lignina. Além de plasticizar a lignina, a termocompressão também tem os objetivos de acelerar a polimerização do adesivo e consolidar o colchão até a espessura desejada, ou seja, densificar o painel, de forma a permitir um contato adequado entre as partículas.

Outro fator a considerar na adequação da matéria-prima a ser utilizada na produção do aglomerado é o teor de extrativos. Os extrativos fazem parte da estrutura da madeira. Nesta classe encontram-se substâncias corantes, óleos, gorduras, resinas, gomas, taninos etc. (SJOSTROM, 1993). Além dos extrativos, o pH da madeira pode interferir negativamente nas propriedades dos painéis, pois se a madeira apresentar acidez elevada pode alterar o pH do adesivo e prejudicar o processo de cura da ligação adesiva.

Os dois tipos de adesivos mais utilizados para colagem de madeira são a uréia-formaldeído e o fenol-formaldeído. São classificados como adesivos sintéticos termofixos. A uréia apresenta coloração leitosa, tem vida útil de aproximadamente seis meses em temperatura ambiente, pH de 7,4 – 7,8, teor de sólidos em torno de 65% e é de uso interno, devido à baixa resistência à umidade. O fenol apresenta coloração marron-avermelhada, vida útil em torno de quatro meses em temperatura ambiente, temperatura de cura na faixa de

130 – 150 °C, pH na faixa de 11 – 13, teor de sólidos em torno de 47% e é classificado como de uso externo, devido à resistência à umidade (IWAKIRI, 2003).

Além da madeira, principal fonte brasileira de matéria-prima para produção de chapas de partículas, outros polímeros, principalmente aqueles de composição termoplástica, têm sido testados, fundidos ou em forma de partículas, para a elaboração desses produtos compostos de matriz bifásica (LIANG et al., 1994; COUTINHO et al., 1998; YOUNGQUIST et al., 1999; MACIEL, 2001, COSTA, 2003; MILAGRES, 2001).

2.1.2. Acetilação da Madeira

A madeira é um material que apresenta elevada instabilidade dimensional, variando suas dimensões de acordo com o teor de umidade presente no ambiente. Este caráter instável se deve, em parte, aos grupamentos hidroxílicos, presentes em maior proporção nas cadeias de celulose e de hemicelulose (SJÖSTRÖM, 1993).

Uma vez que o inchamento e a contração ocorrem pela entrada e saída de água das paredes celulares, madeiras que possuem células de paredes espessas (alta massa específica) em abundância apresentam estes fenômenos em grau mais acentuado (BURGER; RICHTER, 1991).

Uma das formas de tornar a madeira mais estável é modificando seus sítios de adsorção, o que faz com que ela diminua seu caráter hidrofílico. Dentre os vários processos químicos conhecidos de tratamento da madeira com a finalidade de modificar seus sítios de adsorção está a acetilação.

De 1930 até 1960 várias pesquisas foram realizadas, visando descobrir novos tratamentos para madeira. Várias tentativas foram feitas, como acetilação de grupos hidroxilas presentes na madeira, ligação da celulose com formaldeído, adição de óxidos de etileno, polietileno glicol (PEG), entre outros. Estes tratamentos reduzem a resistência da madeira, conferindo-lhe maior estabilidade dimensional. Tratamentos na madeira, como acetilação, além de promover ganhos quanto à estabilidade, aumentam significativamente a resistência à biodeterioração, em especial contra fungos.

A acetilação é um processo químico no qual se emprega o anidrido acético como agente doador de grupos acetil, promovendo a substituição das hidroxilas primárias e secundárias acessíveis na madeira durante a reação. Em empresas de produtos derivados da celulose esse processo é bastante eficiente devido ao emprego de ácidos, por exemplo, o ácido fosfórico, como agente auxiliar, promovendo maior acessibilidade das hidroxilas; este processo denominado acetilação homogênea.

Na acetilação heterogênea não há o emprego de ácidos no processo e a substituição nos grupamentos hidroxilas ocorre aleatoriamente, ou seja, o grupo mais acessível é atacado primeiro, sem haver, exatamente, uma ordem durante a substituição; o contrário ocorre durante a acetilação homogênea, onde a substituição das hidroxilas primárias sempre ocorre antes da substituição das hidroxilas secundárias (KRÄSSIG, 1993).

Ainda segundo Krässig (1993), as condições ótimas para se certificar de uma boa reatividade dos substratos fibrosos de celulose nas interações químicas são:

- enfraquecimento da parede primária, no caso de celulosas nativas, como algodão, por pré-tratamentos com hidrólise;
- permanência ou alargamento dos capilares existentes, vazios ou interstícios fibrilares, na morfologia da fibra e através de reações do substrato da fibra no estado quase seco ou seco, sob condições apropriadas, como sob inclusão de compostos inertes para a reação subsequente;
- aumento da superfície interna, acessível através do inchamento e, ou, tratamentos de ativação, atuando em nível interfibrilar, a fim de quebrar as interligações fibrilares; e
- seleção de meios de reação e condições capazes de abrir as ligações de hidrogênio intra e, principalmente, intermoleculares.

Um substrato de celulose que demonstra boa reatividade, por exemplo, na nitratação não reage necessariamente de forma apropriada na acetilação, xantação ou metilação. Independente da morfologia e estrutura, a sua resposta a um determinado meio de reação é também dependente da pureza; por exemplo, a presença de ceras no caso do algodão natural e de lignina residual ou hemicelulose no caso de polpas dissolventes pode desempenhar um importante papel (KRÄSSIG, 1993).

Através da acetilação é produzido o acetato de celulose, o mais importante éster de ácido orgânico de celulose. Ele é produzido comercialmente para uma vasta variedade de usos finais, como a fabricação do fio de acetato de celulose para uso de tecido e estopa para filtros de cigarros, papel para empacotamento e embrulhos, filmes fotográficos, plástico para compressão, processos de modelamento de injeção e protrusão, e um ingrediente dos vernizes.

A adequação dessas aplicações é determinada principalmente pelo grau de substituição e grau de polimerização, que são responsáveis pela solubilidade do acetato de celulose em vários solventes, pela viscosidade de suas soluções, pela compatibilidade com plastificantes e outras resinas, pela processabilidade e pelo valor funcional dos produtos feitos a partir deles. No Quadro 1 estão as informações sobre as características de solubilidade e substituição dos acetatos de celulose comerciais e seus campos de aplicação.

Quadro 1 - Tipos de acetato de celulose comerciais

| Conteúdo de Acetil (%) | Grau de Substituição | Solvente Comum | Aplicação |
|------------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|
| 13,0-18,6 | 0,6-0,9 | Água | - |
| 22,2-32,2 | 1,2-1,8 | 2-metoxil-etanol | Plásticos, vernizes |
| 36,5-42,2 | 2,2-2,7 | Acetona | Fibras, filmes fotográficos |
| 43-44,8 | 2,8-3,0 | Clorofórmio | Tecidos, lâminas, e fibras |

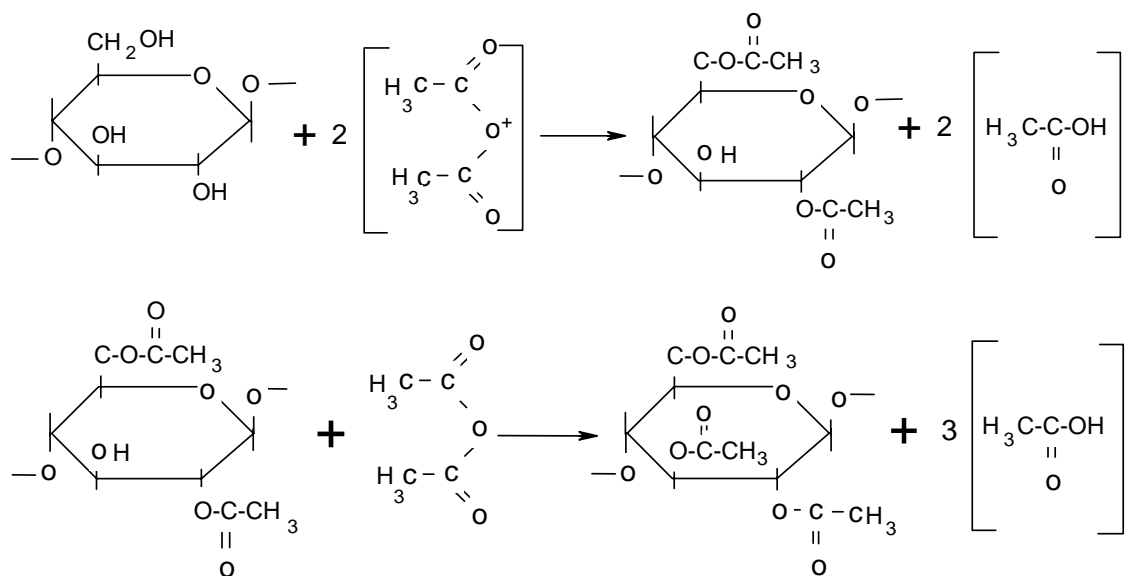
Fonte: Krässig (1993).

Segundo Krässig (1993), durante a acetilação, nos primeiros estágios o agente esterificador penetra nos interstícios interfibrilares. Durante esse estágio, a taxa de acetilação de ambos os tipos de hidroxilas pode ser substancialmente maior do que a taxa de difusão. Sob tais condições, as suas diferentes reatividades na acetilação não importarão, e o resultado observado será a substituição simultânea das hidroxilas primárias e secundárias, à medida que elas são alcançadas pelo reagente.

À medida que a reação passa para o interior, ocorre o melhor ordenamento das unidades fibrilares à taxa de difusão. Nessa fase, a reação mais lenta será influenciada pelo envolvimento das hidroxilas primárias e secundárias nas ligações de hidrogênio intermolecular. A penetração do agente

de esterificação e o progresso da reação de substituição ocorrerão sob o rompimento das ligações de hidrogênio. Sob essas condições, o fator de controle da taxa de reação será a liberação das hidroxilas para a acetilação e, neste caso, a usual reatividade mais elevada das hidroxilas primárias entrará em cena.

Quando a madeira é acetilada, não só as hidroxilas das cadeias de celulose são atingidas, mas também as hidroxilas das hemiceluloses e ligninas. A Figura 1 exemplifica uma reação de acetilação que leva à formação de um triacetato.



Fonte: Cabral (2005).

Figura 1 - Formação de um triacetato de celulose.

Para a fabricação de painéis de madeira reconstituída, deve-se levar em consideração que é necessário que alguns sítios de adsorção fiquem livres, ou seja, sem grupamentos acetil, para que possam reagir com o adesivo aplicado na madeira, com isso é necessário um baixo grau de substituição, sendo, portanto, empregado o método de acetilação heterogênea.

Kokta e Maldas (1990) avaliaram o efeito de anidrido como agente compatibilizador em compósitos de poliestireno/madeira. De acordo com os autores, quando o anidrido é usado como agente compatibilizador o grupo anidrido reage quimicamente com os grupos OH das holoceluloses ou da lignina, para formar ligações éster durante a prensagem e o aquecimento.

Okino et al. (1997) compararam propriedades físicas e mecânicas entre chapas de bagaço de cana confeccionadas com partículas acetiladas e não-acetiladas, utilizando adesivos de uréia-formaldeído e taninos-formaldeído nas proporções de 8 e 12% de sólidos, em base na massa seca das partículas. A absorção de água foi reduzida em 57 e 47% e o inchamento em espessura reduzido em 87 e 80%, após 2 e 24 horas de imersão, respectivamente. A acetilação promoveu redução nos valores médios de resistência à flexão estática, enquanto para tração perpendicular não houve diferença. O maior teor de resina promoveu ganhos, em especial para resina de taninos-formaldeído, que apresentou os melhores valores para resistência física e mecânica.

Cabral (2005) realizou um estudo com acetilação de flocos para produção de painéis tipo OSB. A autora afirmou que os painéis acetilados apresentaram menores médias de variação dimensional que os de partículas não-acetiladas. A acetilação promoveu redução de algumas propriedades mecânicas dos painéis, provavelmente devido à modificação dos sítios onde ocorre interação entre a madeira e o adesivo.

2.2. Termoplásticos

Polímeros são formados por unidades moleculares que se repetem, denominadas monômeros. A reação pela qual os monômeros se unem para formar o polímero recebe o nome de polimerização. As macromoléculas são moléculas grandes, de elevado peso molecular, decorrente da sua complexidade química. Eles podem ser naturais, como a celulose, ou sintéticos, como o polietileno, poliestireno, entre outros plásticos (MANO, 1991).

O termo plástico vem do grego *plastikus*, que significa material adequado à moldagem. Os plásticos são materiais que, embora sólidos à temperatura ambiente, quando aquecidos acima da sua temperatura de fusão tornam-se fluidos e passíveis de serem moldados, por ação isolada ou conjunta de calor e pressão (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Plástico é um material demandado em grande escala. Além de moldáveis, possuem baixa densidade, boa aparência, são isolantes térmicos e acústicos, são resistentes e apresentam baixo custo, apresentando ampla faixa

de utilização. Devido a essas propriedades, o consumo de termoplásticos no Brasil e no mundo vem crescendo.

Apesar da existência de inúmeros termoplásticos, cinco deles (polietileno - PE, polipropileno - PP, poliestireno - PS, policloreto de vinila - PVC e politereftalato - PET) representam 90% do consumo nacional. De acordo com levantamentos de grandes cidades brasileiras, os principais plásticos encontrados nos resíduos sólidos urbanos são o PEBD, PEAD, o PET, o PVC e o PP. Outros resíduos plásticos correspondem a apenas 11% (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Muitas vezes o polímero é formado pela união de dois ou mais monômeros diferentes. Estes polímeros são chamados de copolímeros, em contraste aos homopolímeros, que são formados pela repetição de somente um monômero. Termoplásticos são plásticos que se fundem, quando aquecidos, em oposição aos termofixos, que não apresentam essa característica (MANO, 1991).







O primeiro material polimérico que se tem notícia foi produzido por Charles Goodyear, em 1830. Em 1862, o inglês Alexander Parkers produziu o primeiro plástico. Durável e leve, o material tornou-se um dos maiores fenômenos da era industrial. Em 1929 surgiu a resina uréia-formaldeído. Entre 1930 e 1942, vários polímeros foram descobertos, como o poliestireno (PS), em 1938, e o polietileno tereftalato (PET), em 1941.

Após a Segunda Guerra Mundial, a fabricação e comercialização dos materiais poliméricos alcançaram um grande desenvolvimento, surgindo as resinas epoxídicas em 1947. A década de 1950 foi marcada pelo aparecimento de vários plásticos com importância industrial, como o polietileno linear, o polipropileno e policarbonato (MANO et al., 1999).

A partir de 1960, os plásticos deixaram de substituir apenas a madeira e começaram a ser utilizados em embalagens, substituindo o papelão e o vidro; a partir de 1970, substituíram algumas ligas leves; e a partir de 1980, sua produção tornou-se bastante intensa e diversificada, o que tornou essa indústria uma das principais do mundo (MANO, 1991).

Essas propriedades, juntamente com a sua fácil obtenção, têm possibilitado a sua fabricação em grande escala (MANO et al., 1999). O Quadro 2 apresenta algumas características dos principais polímeros.

Quadro 2 - Propriedades dos principais polímeros termoplásticos.

| Termo-plásticos | Densidade (g cm ⁻³) | Temp. de Transição Vitria (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 | Polietileno 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 | Polietileno de alta densidade – engradados de bebidas, baldes, garrafas para álcool, garrafas para produtos químicos domésticos, bombonas, tambores, tubos; 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, calçados. |
| 4 – PEBD  | 0,91 a 0,94 | -20 a -30 | 109 a 125 | 179 a 331 | 150 a 600 | Polietileno de baixa densidade – embalagens de alimentos, sacos industriais, sacos para lixo, filmes para plasticultura, 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, 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, embalagens em geral. |

Fonte: Extraído de Maciel (2001).

2.2.1. Polietileno de baixa e de alta densidade (PEBD e PEAD)

O polietileno foi descoberto em 1899, por um químico alemão, passando a ser produzido em escala industrial em 1939. Possui uma das estruturas mais simples entre os polímeros termoplásticos e pode ser produzido por vários processos, o que lhe confere características próprias (MILAGRES, 2001).

Dependendo da natureza química dos monômeros e da técnica empregada para a polimerização, os polímeros podem exibir diferentes tipos de arquitetura. Os mais comuns são os de estrutura linear, ramificada ou em rede. O polietileno de alta densidade (PEAD) é uma molécula de cadeia longa e

linear, feita através da polimerização do etileno, um composto cuja fórmula estrutural é $\text{CH}_2=\text{CH}_2$. O PEAD tem densidade entre 0,94 e 0,98 g cm^{-3} , apresenta moléculas isentas de ramificações e é um plástico rígido e resistente à tração. Apresenta ampla utilização, como essas garrafas e recipientes, brinquedos, engradados de bebidas e materiais hospitalares, além de utensílios, como baldes e mangueiras (MANO et al., 1999).

A indústria também produz uma outra variedade de polietileno, que possui cadeias ramificadas, conhecido como polietileno de baixa densidade (PEBD). Tem densidade de 0,91 a 0,94 g cm^{-3} , apresenta moléculas com alto grau de ramificações e é flexível, com boa dureza, elevada resistência química e facilmente processável. É utilizado em filmes, isolamentos, embalagens, dentre outros (MANO et al., 1999).

O impedimento espacial provocado pelas ramificações dificulta um "empilhamento" das cadeias poliméricas. Por esta razão, as forças intermoleculares que mantêm as cadeias poliméricas unidas tendem a ser mais fracas em polímeros ramificados. Por isso, o PEBD é bastante flexível e pode ser utilizado como filme plástico para embalagens, enquanto o PEAD é bastante duro e resistente, sendo utilizado em garrafas, brinquedos, entre outros (MANO et al., 1999).

Apesar das várias vantagens, alguns inconvenientes também surgiram. Os plásticos, diferentemente de outros materiais, levam muito tempo para se degradarem, portanto permanecem praticamente intactos por anos, o que causa problemas ambientais. Iniciativas para a solução desse problema têm surgido, dentre elas, a reciclagem.

2.2.2. Reciclagem de polímeros plásticos

Um programa de reciclagem é uma opção eficiente de manejo dos resíduos sólidos, quando os benefícios ambientais e econômicos superam os custos ambientais e econômicos. Alguns processos de reciclagem podem gerar mais poluição que a destinação de resíduos para um aterro sanitário. A reciclagem é uma das formas de tentar resolver o problema do lixo, entretanto não é a única. A redução na fonte ainda é a melhor opção (ZUBEN, 2001).

A reciclagem de polímeros pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

A reciclagem primária e a secundária são conhecidas como reciclagem mecânica ou física. O que diferencia uma da outra é que na primária utiliza-se polímero pós-industrial e na secundária, pós-consumo. A reciclagem terciária também é chamada de química e a quaternária, de energética.

A reciclagem mecânica pode ser viabilizada através do reprocessamento por extrusão, injeção, termocompressão, dentre outros. Para este fim são necessários procedimentos que incluem: separação do resíduo polimérico; moagem; lavagem; secagem; reprocessamento; e, finalmente, transformação do polímero em produto acabado, como reciclagem de embalagens de polipropileno para obtenção de sacos de lixo (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

A reciclagem terciária ou química é a conversão de resíduos poliméricos em produtos químicos e combustíveis, através de processos termoquímicos. Por meio desses processos, os materiais plásticos são convertidos em matérias-primas que novamente podem originar resinas e outras substâncias de interesse para a indústria, como gases e óleos combustíveis. A reciclagem química ainda é pouco difundida em grande escala, devido ao elevado custo (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Quanto à reciclagem energética, é possível fazer uso de seu conteúdo energético, através da incineração, quando a reutilização do resíduo não é prática ou econômica. No Japão, país com alta tecnologia, os resíduos sólidos urbanos são separados em materiais combustíveis e não-combustíveis, para serem incinerados. Em 1993, cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos daquele país, sendo 67% de resíduos poliméricos, foram incinerados em 2 mil incineradores municipais. O valor calórico de 1 kg de resíduos poliméricos é comparável ao de 1 L de óleo combustível e é maior que o do carvão (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Os polímeros plásticos são considerados grandes vilões ambientais, pois podem demorar séculos para se degradarem e ocupam grande parte do volume nos aterros sanitários. Além disso, os resíduos poliméricos, quando descartados em lugares inadequados, como em rios e lixões, causam um grande impacto negativo sobre o ambiente. A reciclagem de forma sistemática é uma das soluções mais viáveis para minimizar o impacto causado pelos

polímeros no ambiente. Vários fatores motivam a reciclagem de polímeros, como economia de energia, preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima, redução dos custos, com disposição final do resíduo, aumento da vida útil dos aterros e geração de emprego e renda (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

2.3. Embalagens cartonadas

As embalagens cartonadas, também conhecidas como longa vida ou multicamadas, foram inventadas por Ruben Rausing, na Suécia, em 1952. No Brasil, o uso de embalagens cartonadas iniciou-se em 1957, com grande sucesso. O sucesso se deve principalmente à possibilidade de transportar produtos perecíveis em longas distâncias, sem a necessidade de refrigeração (CEMPRE, 2005).

As embalagens cartonadas são extremamente eficientes no seu papel de preservação de alimentos. Além deste benefício, a embalagem própria-mente dita é adequada para a redução de resíduos, pois preserva alimentos de forma eficaz, produz menos resíduos alimentícios e reduz a quantidade de material da embalagem, utilizando os recursos naturais de forma adequada. Quanto menor o seu peso, menor será o uso de recursos naturais para sua produção. Para embalar 1 L de alimento em embalagens cartonadas, são necessários apenas 28 g de material, reduzindo também o gasto de combustível durante o transporte (CEMPRE, 2005).

As embalagens cartonadas, longa vida ou multicamadas, são compostas de várias camadas de papel (papelão), polietileno de baixa densidade e alumínio. Esses materiais, em camadas, criam uma barreira que impede a entrada de luz, ar, água, microorganismos e odores externos.

As embalagens cartonadas podem ser de diversos tipos, como as utilizadas para envases, conhecidas como embalagem longa vida, sendo constituída de papel duplex (papel de fibra longa), polietileno de baixa densidade e alumínio, nas proporções de 75, 20 e 5%, respectivamente. O papel duplex é formado por uma camada de celulose marrom e uma camada de celulose branqueada, que recebe a impressão. O branqueamento do papel é feito com a utilização de tecnologia TCF (*total chlorine free*), sem o uso de cloro. Existem outras embalagens que são constituídas de papel branqueado e polietileno,

sendo utilizada para acondicionamento de produtos refrigerados, como sucos; e as embalagens que são constituídas de papel duplex e polietileno, para produtos pasteurizados (ZUBEN et al., 2001).

Em 2003, a taxa de reciclagem das embalagens no Brasil foi de 20%, totalizando cerca de 30 mil toneladas. A taxa mundial de reciclagem de embalagens, pós-consumo, é de 15%. No caso dos trabalhos com coleta seletiva, o peso das embalagens cartonadas no lixo brasileiro é de 2%, segundo o CEMPRE (2005).

Cada tonelada de embalagem reciclada gera aproximadamente 680 kg de papel kraft. No Brasil, é previsto um aumento nas taxas de reciclagem devido à expansão das iniciativas de coleta seletiva com organização de municípios e cooperativas e ao desenvolvimento de novos processos tecnológicos, como a produção de compósitos combinados com madeira.

As iniciativas de coleta seletiva estão em crescimento e são as grandes responsáveis pela separação dos diversos tipos de materiais recicláveis e pelo encaminhamento para as indústrias recicladoras. O mercado de reciclagem de embalagens cartonadas é relativamente grande, uma vez que envolve indústrias papeleiras, de plástico e também fabricantes de placas e telhas, além de contribuir para o crescimento do mercado de produtos reciclados, como vassouras, canetas e prendedores. Outro ponto a destacar é o leque de oportunidades que surge com o uso das embalagens descartadas como matéria-prima alternativa para fabricação de móveis, peças para escritório, entre outros a serem desenvolvidos (CEMPRE, 2005).

Como a matéria-prima principal das embalagens cartonadas é o papel, há a possibilidade de utilizá-lo para compostagem, sendo encaminhado para produção de húmus. No entanto, essa não é a melhor alternativa, uma vez que não possibilita o reaproveitamento do polietileno de baixa densidade e do alumínio contido nas embalagens.

Essas embalagens têm poder calorífico de $11.354 \text{ kcal kg}^{-1}$. Isso significa que 1 t gera energia na forma de calor equivalente ao que é obtido com a queima de 5 m³ de lenha ou 500 kg de óleo combustível. Além do vapor d'água, a queima produz gás carbônico e trióxido de alumínio na forma sólida, que pode ser utilizado como agente floculante em tratamento de água ou como agente refratário em altos-fornos. Essa alternativa é bastante

difundida em países europeus e no Japão, que possuem incineradores com controles ambientais eficientes e preparados para realizar essa recuperação energética.

Como as embalagens são compostas por materiais estáveis e atóxicos, a sua destinação para aterros sanitários não ocasiona maiores problemas e nem ocupa muito espaço. Trezentas embalagens cartonadas de 1 L, vazias e compactadas, ocupam o equivalente a 11 L. Estudos da Universidade de São Paulo – USP – atestam que após seis meses 49% da embalagem se decompõe totalmente quando disposta corretamente em aterros adequados.

2.4. Compósitos com madeira

Compósitos de plástico/madeira têm sido intensamente estudados em períodos recentes, principalmente aqueles produzidos com a mistura de madeira com polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC) e poliéster (BREGNER et al., 1988; HAN et al., 1989; YAN et al., 1990; SIMONSEN et al., 1998; WANAGE et al., 1998; MACIEL, 2001; COSTA, 2003, MILAGRES, 2001). A tecnologia de produção de compósitos termoplásticos reforçados com fibras lignocelulósicas utiliza como matérias-primas, entre outros, em função de disponibilidade e adequação aos sistemas produtivos, os plásticos polietileno e polipropileno em mistura de farinha e fibras de madeira (ENGLISH et al., 1996).

Este tipo de material pode oferecer uma série de benefícios, como baixo custo, produtos com melhores propriedades, facilidade de processamento e maior resistência (KRISHNAN et al., 1992). Entretanto, na região de contato desses polímeros, praticamente não ocorre interação superficial, dificultando a adesão, devido à incompatibilidade entre os materiais. As características hidrofílica e hidrofóbica da madeira e do plástico, respectivamente, geram grandes problemas na adesão e, conseqüentemente, na qualidade do compósito.

Estudos indicam três possíveis caminhos para solucionar esse problema: tratamentos na superfície das partículas de plástico, como a diminuição da tensão superficial; tratamentos na superfície das partículas de madeira, para diminuir a higroscopicidade da madeira, por meio de acetilação, conforme

proposto por Rowell (1986); e, ainda, tratamentos nas variáveis de produção, como derretimento do plástico na prensagem.

Segundo Carvalho (2003), a estrutura e as propriedades de interface fibra/matriz são de fundamental importância nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos. As propriedades da madeira e do reforço devem se comunicar através da interface; em outras palavras, os esforços que atuam sobre a matriz são transmitidos para as fibras através da interface. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início das falhas, comprometendo o desempenho do compósito. A maior dificuldade no processo de compatibilização entre os componentes do compósito na região interfacial é combinar suas diferentes características químicas.

Ainda segundo Carvalho (2003), a preocupação com a interface fez com que a tecnologia de fabricação dos compósitos desenvolvesse processos e, ou, produtos para facilitar o acoplamento dos componentes na região interfacial. Esses produtos são chamados de agentes de acoplamento. Tais agentes possuem características bi ou polifuncionais e amenizam as diferenças entre os constituintes do compósito. O termo agente de acoplamento designa o agente químico que é utilizado para tratar os reforços para obter propriedades físicas melhores.

Os agentes são moléculas anfóteras, possuindo funcionalidade dupla (ou múltipla), de modo que uma parte da molécula adere ao polímero e outra ao reforço, formando uma ponte entre os dois materiais. Considerando que a falta de afinidade é inerente entre certos polímeros e seu reforço, ou seja, entre a madeira e o plástico, os agentes de acoplamento possuem grande importância no desenvolvimento de compósitos, pois promovem a união química entre as fases ou alteram a energia superficial do reforço, permitindo um molhamento eficiente (CARVALHO, 2003).

Vick et al. (1991) estudaram o efeito da geometria e da acetilação nas chapas de flocos, utilizando adesivo de isocianato com 50% de oligômeros. Os parâmetros avaliados foram, após teste de envelhecimento acelerado, módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), tração perpendicular e inchamento em espessura. Para MOR e MOE, os flocos maiores apresentaram maiores valores. Para resistência à tração perpendicular, os melhores

resultados foram para os flocos menores. A acetilação interferiu de forma mais acentuada nos valores de tração perpendicular e inchamento em espessura.

Segundo Rowell (1993), falhas na adesão de chapas de partículas ou fibras de madeira podem ser resultado de diversos fatores, como pobre interação interfacial entre as superfícies da madeira e da resina. Devido à natureza química dos polímeros presentes na parede celular, por meio de tratamentos superficiais, eles podem promover melhor adesão. Um dos métodos em que se pode obter sucesso é o uso de resinas à base de isocianatos (MDI).

Para Coutinho et al. (1998), as propriedades da superfície de fibras celulósicas podem ser modificadas com tratamentos que utilizem agentes de acoplamento, que age como ponte entre a superfície hidrofílica da celulose e hidrofóbica do plástico, na interface fibra/plástico. Agentes de acoplamento como silanos, isocianatos, anidrido maleico, ácido esteárico, entre outros, têm sido usados em pesquisas com compósitos de fibras de madeira e plástico.

Esses autores prepararam compósitos de polipropileno com fibras de madeiras modificadas com silanos e polipropileno maleatado (PPMA), empregando temperaturas de 170, 180 e 190 °C. Foi avaliada a adesão entre a matriz e as fibras de madeira. Os melhores resultados foram obtidos com o uso de silano na presença ou não de polipropileno maleatado, em temperatura de 180 °C.

Falk et al. (1999) compararam painéis de madeira com painéis de madeira/plástico (polietileno e polipropileno). Os autores afirmam que, em geral, os compósitos de madeira/plástico apresentaram desempenho inferior ao dos painéis de madeira, entretanto os resultados foram satisfatórios, levando-se em conta as normas utilizadas para chapas convencionais.

Maciel (2001) produziu compósitos a partir de diferentes proporções de madeira e plástico. Ele avaliou, entre outros, diferentes proporções de partículas de poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET) combinadas com madeira e solução de PS em tolueno como agente de acoplamento. Segundo o autor, chapas produzidas com proporções de 50% de partículas de madeira e 50% de partículas de poliestireno e solução de poliestireno em tolueno apresentaram resultados satisfatórios, quanto aos valores médios de MOR e MOE. A absorção de água e o inchamento em espessura foram menos

intensos nas chapas produzidas com solução de poliestireno em tolueno, com maior quantidade de plástico e nível mais elevado de adesivo.

Costa (2003) avaliou propriedades de compósitos de partículas de madeira combinada com poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET). O autor concluiu que a inclusão de PET e PS permitiu a produção de chapas com maior estabilidade dimensional, porém, verificou-se também redução das propriedades mecânicas.

Oliveira et al. (2003) também avaliaram o efeito da solução de PS em tolueno, na concentração de 20%, na qualidade dos compósitos madeira/plástico. Além da solução utilizada como agente de acoplamento, avaliou-se o efeito do tratamento das partículas de PET com ultra-som e microondas, visando possíveis alterações na superfície do PET, de forma a facilitar a adesão. No entanto, apesar de uma leve tendência de melhoria das propriedades físicas e mecânicas em função do aumento do teor da solução, o incremento não foi muito significativo. Nos tratamentos nos quais o PET passou pelo tratamento de ultra-sonificação e microondas, os valores de resistência e estabilidade foram reduzidos.

Milagres (2001) avaliou a qualidade de compósitos produzidos a partir da combinação de partículas de madeira de eucalipto com polietileno de baixa e de alta densidade e polipropileno. Foram fabricados painéis de madeira e plástico, empregando-se os três tipos de plástico em três teores (0, 25 e 50%) e três tipos de adesivos (uréia-formaldeído, fenol-formaldeído e uréia misturado com 0,5% de adesivo epóxi), na proporção de 8% da massa de partículas, além de parafina. Os painéis produzidos com PEAD apresentaram menores médias de variação dimensional, o que indica que esse plástico é uma boa matéria-prima, combinado com madeira, para produção de painéis.

O Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecologicamente Correta – Idhea (2005) informa a comercialização de uma “chapa ecológica”, produzida, segundo informações do Instituto, a partir do uso de resíduos plásticos e de alumínio contido nas embalagens cartonadas, pós-consumo, na proporção de 70%. Ainda segundo o Instituto, as chapas são produzidas por termocompressão, apresentando bom desempenho, sendo utilizadas, por exemplo, como revestimentos e forros de casa de alto padrão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do material utilizado

A madeira de *Eucalyptus grandis* foi obtida de plantios comerciais pertencentes a empresas florestais, localizadas nos municípios de Ponte Alta, região do Vale do Rio Doce (latitude sul 19° 42' e longitude oeste 47° 39'), e Três Marias, região de cerrado (latitude sul 18° 12' e longitude oeste 45° 14'), no Estado de Minas Gerais. A madeira proveniente de Ponte Alta, com 10 anos, apresentou densidade de 0,55 g cm⁻³, e a madeira de Três Marias, com 7 anos, apresentou densidade média de 0,56 g cm⁻³. Foi utilizada, para produção das partículas, madeira das duas procedências, em proporções iguais.

Utilizaram-se dois tipos de partículas de madeira de eucalipto, partículas sem nenhum tipo de tratamento, denominadas partículas não-acetiladas, e acetiladas, tratadas com anidrido acético sob pressão e temperatura.

Os resíduos de embalagens cartonadas e os polietilenos de baixa densidade (PEBD) e de alta densidade (PEAD) foram obtidos, respectivamente, de um depósito de materiais recicláveis localizado no *campus* da UFV (ASBEN) e de uma recicladora de plásticos situadas em Belo Horizonte.

O adesivo utilizado foi o fenol-formaldeído (CASCOPHEN HL-2080 BORDEN-Química). Aplicaram-se nas chapas 8% de sólidos resinosos. Foi utilizada também uma emulsão de parafina, aplicada na proporção de 0,5%.

3.2. Preparação das partículas de madeira

As toras de *Eucalyptus grandis* foram, inicialmente, pré-processadas, gerando tábuas com 1 m de comprimento e 2 cm de espessura, que posteriormente foram transformadas em baguetas com dimensão adequada, aproximadamente 6 cm de largura, para serem introduzidas em um moinho laboratorial, para geração dos flocos. As baguetas foram saturadas e aquecidas, a aproximadamente 100 °C, em autoclave, por 2 horas, gerando-se os flocos em um moinho a disco.

Em seguida, os flocos sofreram uma fragmentação secundária, gerando as partículas, em um moinho de martelo. As partículas foram classificadas, manualmente em peneiras, pela ação da gravidade, utilizando-se as partículas que passaram pela peneira de 43,60 mm² e ficaram retidas na de 7,43 mm². Em seguida, as partículas foram secas em estufa, até atingir a umidade de aproximadamente 3%. As partículas foram armazenadas em sacos plásticos, até sua utilização para produção dos compósitos.

As partículas de madeira produzidas em laboratório a partir dos flocos, conforme descrito anteriormente, foram secas até umidade de 0%, em estufa. Em seguida, foram pesadas e inseridas em uma autoclave, onde foram saturadas por 1 hora com anidrido acético. Após 1 hora, o anidrido foi drenado e a autoclave aquecida a 120 °C, por 3 horas, conforme técnica descrita por Rowell et al. (1986). As partículas foram ainda mantidas por mais 2 horas, com o equipamento desligado. As partículas foram deixadas ao ar livre, para evaporação do excesso de reagente, e secas em estufa a 0% de umidade; posteriormente, elas foram armazenadas em sacos plásticos, até a produção dos painéis.

3.3. Preparação das partículas de plástico

As resinas termoplásticas foram lavadas antes de entrarem no processo de produção dos compósitos. Os resíduos termoplásticos foram obtidos nas empresas de reciclagem, em pequenas dimensões, sendo então encaminhados direto para fragmentação secundária no moinho de martelo, produzindo as partículas de polietileno de alta (PEAD) e de baixa densidade (PEBD).

Em seguida, as partículas foram classificadas, de forma semelhante às partículas de madeira, pela ação da gravidade, e posteriormente foram armazenadas em sacos plásticos, até sua utilização para produção dos compósitos.

3.4. Preparação das partículas de embalagens cartonadas

As embalagens cartonadas, pós-consumo, foram guilhotinadas e transformadas em “lâminas”, para facilitar a lavagem das embalagens. Em seguida, as embalagens foram secas à temperatura ambiente e transformadas em partículas em moinho de martelo laboratorial. Como as embalagens cartonadas contêm papel em sua constituição, as partículas foram secas em estufa, até atingirem umidade em torno de 3%.

3.5. Preparo e prensagem dos compósitos

A massa de partículas da mistura empregada na produção das chapas, foi estimada de forma a permitir a produção de quatro chapas por tratamento, com dimensões de 10 x 400 x 400 mm e densidade final de aproximadamente $0,70 \text{ g cm}^{-3}$. As frações de madeira e resíduos (plásticos e embalagens cartonadas) foram calculadas em função destes parâmetros. As partículas da mistura, após pesadas, foram colocadas em um misturador tipo tambor rotatório, para pulverização da parafina e do adesivo, que foram aplicados por meio de bico injetor, inserido no misturador e acionado por um compressor de ar. Após a aplicação do adesivo, a massa de partículas previamente pesada, foi levada à seção formadora do colchão, onde as partículas foram manualmente distribuídas sobre uma chapa de alumínio, para posterior prensagem. A prensagem ocorreu com temperatura de $170 \text{ }^\circ\text{C}$, em um ciclo de 8 minutos e taxa de compressão suficiente para se obter chapas com 10 mm de espessura.

3.6. Confeccção dos corpos-de-prova

Após a produção das chapas, elas foram condicionadas à temperatura ambiente e, em seguida, suas bordas foram aparadas para $35,0 \times 35,0 \text{ mm}$ e suas superfícies lixadas. Após o esquadreamento e lixamento, as chapas

foram seccionadas para confecção dos corpos-de-prova em diferentes dimensões, de acordo com o teste a ser realizado.

Foram determinados os seguintes parâmetros:

- densidade;
- umidade de equilíbrio higroscópico (UEH);
- módulo de ruptura (MOR);
- módulo de elasticidade (MOE);
- tração perpendicular (TP);
- arrancamento de parafuso (AP);
- dureza janka (DJ);
- compressão longitudinal (CL);
- inchamento em espessura (IE), 90% de UR, 2 e 24 horas de imersão;
- expansão linear (EL), 90% de UR, 2 e 24 horas de imersão;
- adsorção de umidade (AU), 90% de UR; e
- absorção de água (AA), 2 e 24 horas de imersão.

Os corpos-de-prova foram preparados conforme o esquema apresentado na Figura 2 e, posteriormente, aclimatados de acordo com a norma ASTM D-1037 (1991), a 20 °C de temperatura e 65% de UR.

Após equilíbrio, os corpos-de-prova foram encaminhados para os testes mecânicos em uma máquina universal de ensaios CONTENCO de 10 toneladas, do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira - LPE/DEF/UFV. Foi feita uma adaptação, que consistiu em retirar dois corpos-de-prova da “sobra”, nas dimensões de 2,5 x 10 cm, para realização do teste de compressão longitudinal.

Para os testes de estabilidade dimensional, após a aclimação dos corpos-de-prova, com o auxílio de um gabarito, foram marcados dois pontos equidistantes 20 cm um do outro, para o teste de expansão linear, mensurando o aumento da distância entre os pregos. Para o teste de inchamento, a espessura foi medida em três pontos equidistantes. Para o teste de adsorção de umidade e absorção de água, as massas dos corpos-de-prova foram anotadas.

As propriedades foram comparadas aos valores mínimos exigidos pela norma comercial ANSI/A – 208.1–1993, conforme mostrado no Quadro 3.

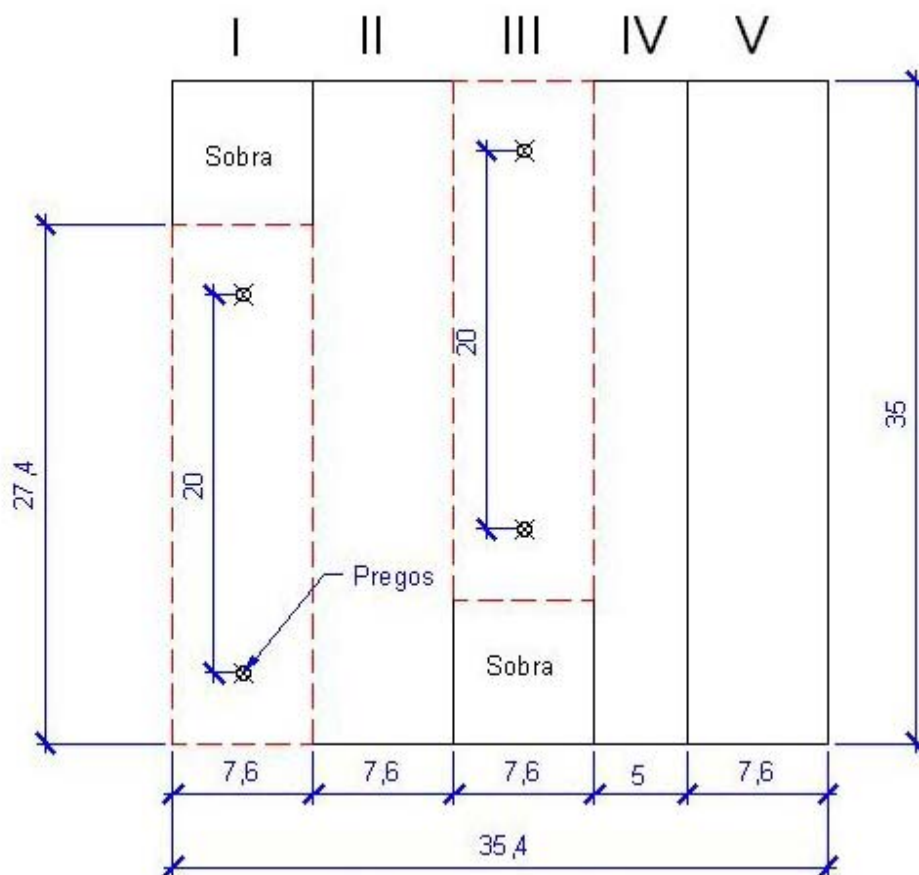


Figura 2 - Posições nas chapas para retirada dos corpos-de-prova.

Quadro 3 - Propriedades requeridas para chapas de partículas

| Classificação | Inchamento em Espessura | Expansão Linear (%) | Flexão Estática | | Ligação Interna (kgf cm ⁻²) | Arrancamento de Parafusos (kgf) | | Dureza (kgf cm ⁻²) |
|---------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|-------|--------------------------------|
| | Tolerância média do painel (mm) | | MOE (kgf cm ⁻²) | MOR (kgf cm ⁻²) | | Face | Borda | |
| H - 1 | ± 0,10 | NE | 24.000 | 165 | 9,0 | 180 | 132,5 | 222,5 |
| H - 2 | ± 0,10 | NE | 24.000 | 205 | 9,0 | 190 | 155,0 | 445,0 |
| H - 3 | ± 0,10 | NE | 27.500 | 235 | 10,0 | 200 | 155,0 | 667,5 |
| M - 1 | ± 0,15 | 0,35 | 17.250 | 110 | 4,0 | 90 | 80,0 | 222,5 |
| M - S | ± 0,15 | 0,35 | 19.000 | 125 | 4,0 | 90 | 80,0 | 222,5 |
| M - 2 | ± 0,10 | 0,35 | 22.500 | 145 | 4,5 | 100 | 90,0 | 222,5 |
| M - 3 | ± 0,10 | 0,35 | 27.500 | 165 | 5,5 | 110 | 100,0 | 222,5 |
| LD - 1 | ± 0,15 | 0,35 | 5.500 | 30 | 1,0 | 40 | NE | NE |
| LD - 2 | ± 0,15 | 0,35 | 10.250 | 50 | 1,5 | 55 | NE | NE |

H – Alta densidade (superior a 800 kg m⁻³); M – Média densidade (entre 640 – 800 kg m⁻³); LD – Baixa densidade (menor que 640 kg m⁻³); NE – Não-especificado.

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

3.7. Delineamento experimental

Foi realizado um experimento constituído de sete composições de partículas, e dois tipos de partículas de madeira, acetiladas e não-acetiladas, com quatro repetições, totalizando 56 painéis, conforme discriminado no Quadro 4. Os resultados do experimento foram interpretados com o auxílio de análise de variância. Quando observado efeito significativo, as médias foram comparadas entre si, empregando-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Quadro 4 - Descrição dos tratamentos do experimento

| Tratamento | Composição | Partículas de Madeira | |
|------------|--|-----------------------|----------------|
| 1 | 100% madeira <i>E. grandis</i> | acetiladas | não-acetiladas |
| 2 | 80% madeira <i>E. grandis</i> / 20% PEBD | acetiladas | não-acetiladas |
| 3 | 60% madeira <i>E. grandis</i> / 40% PEBD | acetiladas | não-acetiladas |
| 4 | 80% madeira <i>E. grandis</i> / 20% PEAD | acetiladas | não-acetiladas |
| 5 | 60% madeira <i>E. grandis</i> / 40% PEAD | acetiladas | não-acetiladas |
| 6 | 80% madeira <i>E. grandis</i> / 20% EC | acetiladas | não-acetiladas |
| 7 | 60% madeira <i>E. grandis</i> / 40% EC | acetiladas | não-acetiladas |

Em que PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade

O valor médio de densidade dos painéis produzidos foi de $0,71 \text{ g cm}^{-3}$, sendo, portanto, compósitos de média densidade (ANSI/A-93). As densidades médias por tratamento, apresentadas na Figura 3, foram estatisticamente iguais. Apesar de ter sido obtido um teor médio de acetilação de 22%, este tratamento não interferiu na densidade das chapas porque a massa de partículas acetiladas foi determinada para obter uma densidade igual a $0,70 \text{ g cm}^{-3}$.

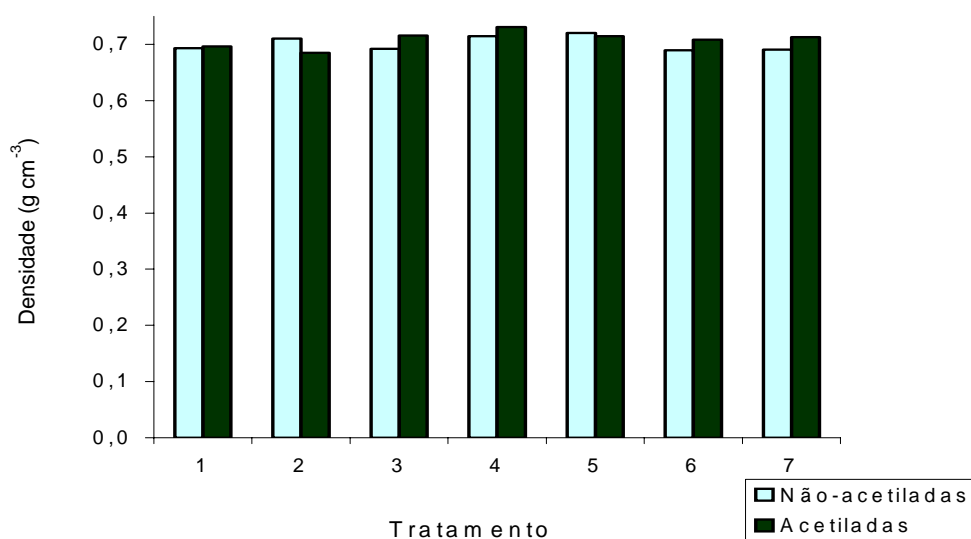


Figura 3 - Valores médios de densidade (g cm^{-3}).

4.2. Umidade de equilíbrio higroscópico – UEH

A umidade de equilíbrio higroscópico da madeira é função da temperatura e da umidade relativa do ar. Os valores médios de umidade de equilíbrio dos painéis, depois de aclimatados nas condições de 65% umidade relativa e 20 °C de temperatura, estão apresentados no Quadro 5 e na Figura 4.

Quadro 5 - Valores médios de UEH (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|----------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 12,65 A a | 6,56 B ab | 48,1 | 9,60 a |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 10,35 A c | 5,39 B cd | 47,9 | 7,87 c |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 7,78 A e | 4,41 B e | 43,3 | 6,09 d |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 9,57 A d | 5,84 B bcd | 39,0 | 7,70 c |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 7,88 A e | 5,05 B dc | 35,9 | 6,47 d |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 11,12 A bc | 6,24 B abc | 43,9 | 8,68 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 10,69 A bc | 6,55 B ab | 38,7 | 8,62 b |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

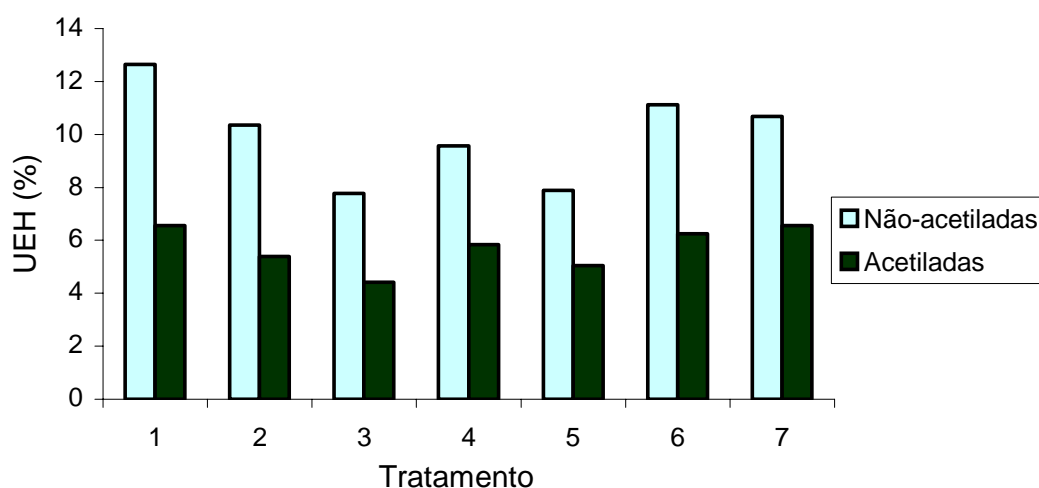


Figura 4 - Valores médios de UEH (%).

Como se pode observar, os painéis compostos apenas por madeira, seguidos pelos painéis com partículas de embalagens cartonadas, apresentaram médias estatisticamente superiores às das composições com plástico.

Os valores médios significativamente menores de umidade de equilíbrio das chapas com partículas de plástico se deve ao caráter hidrofóbico deste material, e está de acordo com os resultados observados por outros pesquisadores (MACIEL, 2001; COSTA, 2003; MILAGRES, 2001).

Todas as chapas com partículas de madeira acetiladas apresentaram valores médios de equilíbrio estatisticamente inferior às médias apresentadas pelas partículas não-acetiladas, proporcionando uma redução de umidade de equilíbrio de 48,1% no caso de painéis com apenas partículas de madeira. Isso indica que a acetilação foi eficiente na alteração dos sítios de adsorção da madeira.

Outro fato relevante a ser considerado refere-se aos valores médios de equilíbrio dentro de cada tipo de partículas. Observa-se, que o acréscimo de plástico provocou redução das médias de umidade de equilíbrio, tanto para as partículas não-acetiladas quanto para as partículas acetiladas. Independentemente do tipo de partícula, as chapas contendo 60% madeira e 40% PEBD apresentaram as menores médias de umidade de equilíbrio, enquanto o maior valor geral foi observado para as chapas com apenas partículas de madeira.

O uso de partículas acetiladas nos compósitos contendo embalagens cartonadas ocasionou redução significativa no teor de umidade de equilíbrio higroscópico em relação às partículas não-acetiladas. O acréscimo no teor de partículas de embalagens cartonadas provocou redução numérica adicional no valor da umidade de equilíbrio dos compósitos com partículas não-acetiladas, contudo a diferença não foi significativa. Esse fato se deve, provavelmente, à presença de plástico e alumínio nesse tipo de embalagem. Para as chapas fabricadas com partículas acetiladas, a adição de partículas de embalagens cartonadas não alterou de forma significativa a umidade de equilíbrio.

4.3. Módulo de ruptura – MOR

O Quadro 6 e a Figura 5 apresentam os valores médios de MOR em função do tipo e da composição das partículas. Observa-se que os painéis produzidos apenas com madeira, seguidos pelos painéis com 20% de plástico, apresentaram a média geral estatisticamente superior à das demais composições. Os painéis com 40% de PEBD e 40% de embalagens cartonadas

tiveram MOR significativamente menor que os dos demais painéis. Ou seja, à medida que se acrescentou plástico ou embalagem cartonada, a resistência mecânica diminuiu, conforme indicado pela média geral.

Quadro 6 - Valores médios de MOR (kgf cm^{-2})

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|---------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 199,05 A ab | 138,38 B abc | 30,5 | 168,7 ab |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 188,93 A abc | 109,55 B cd | 42,0 | 149,2 bc |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 140,60 A e | 95,85 B d | 31,8 | 118,1 d |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 170,08 A bcd | 140,18 B abc | 17,6 | 155,1 ab |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 161,07 A cde | 119,70 B bcd | 25,7 | 140,4 c |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 147,98 A de | 126,91 B abcd | 14,2 | 137,4 c |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 108,12 A f | 120,62 A bcd | -11,0 | 114,4 d |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

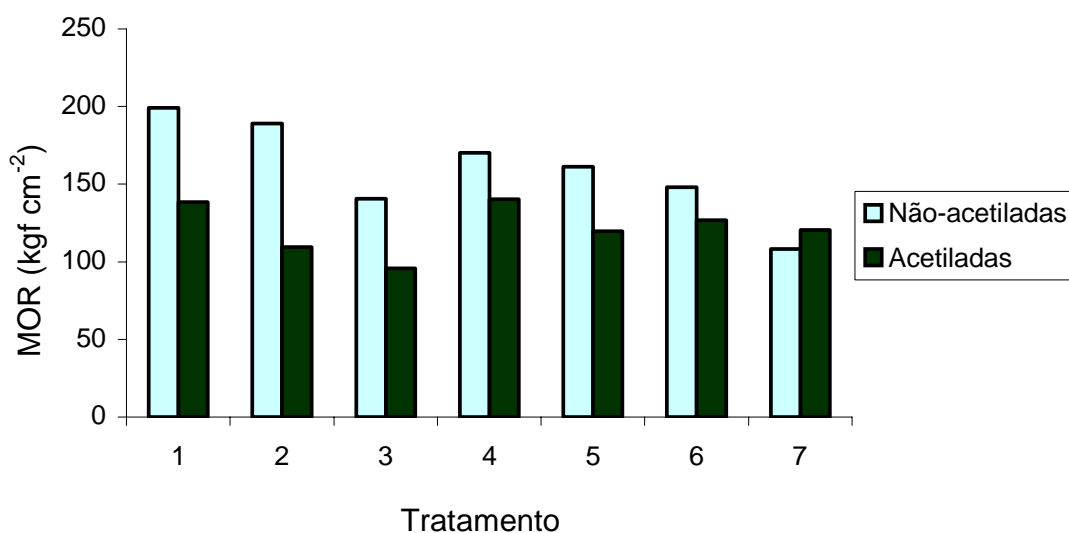


Figura 5 - Valores médios de MOR (kgf cm^{-2}).

A norma ANSI/A-93 preconiza resistência mínima de 110 kgf cm^{-2} . De acordo com a média geral, observa-se que todos os painéis atingiram o valor comercial, entretanto quando são utilizados PEBD e partículas de madeira acetiladas, independentemente da proporção, os valores observados ficaram

abaixo do mínimo. Chapas com 40% de embalagens cartonadas e partículas de madeira não-acetiladas também não atingiram o valor mínimo da norma.

De modo geral, a acetilação das partículas promoveu redução significativa do módulo de ruptura para todas os tratamentos, exceto aquele com 40% de embalagens cartonadas, em que, além de não se detectar diferença, houve acréscimo de 11% no valor de MOR, em relação às chapas não-acetiladas.

O MOR das chapas fabricadas com 100% de partículas não-acetiladas foi igual ao daquelas com 80% madeira e 20% plástico. O acréscimo de material plástico ou de embalagens cartonadas promoveu redução nas médias de MOR. Para chapas produzidas com partículas acetiladas, o tratamento com 40% PEBD apresentou a menor média, significativamente inferior à das chapas com 100% madeira e 20% de PEAD.

As composições com maior conteúdo de material plástico ou de embalagens cartonadas apresentaram as menores médias, exceto para o PEAD, que não apresentou diferença significativa entre painéis com 20 ou 40% desse tipo de plástico.

Com isso, constatou-se que o acréscimo de plástico ou de embalagens cartonadas causou redução da resistência mecânica dos painéis. Esse fato é provavelmente devido à menor adesão entre as partículas de madeira e de plástico, bem como de madeira e embalagens cartonadas, o que causa deficiência na transmissão de esforços, como no teste de flexão estática.

Como se pode constatar no Quadro 6 e na Figura 5, houve interação entre a composição das partículas e o tipo de partículas. Painéis fabricados com partículas acetiladas foram menos resistentes, exceto aquelas com 60% madeira e 40% de embalagens cartonadas, onde não se verificou diferença significativa entre o uso de partículas acetiladas e não-acetiladas.

Alguns autores, como Cabral (2005), correlacionam a acetilação ou outros tratamentos que modificam os sítios de hidroxilas com a redução das propriedades de flexão estática. Isso ocorre porque, uma vez acetilados, esses sítios não podem mais interagir com o adesivo, acarretando uma adesão de menor resistência (OKINO et al., 1997).

4.4 Módulo de elasticidade – MOE

Os valores médios de MOE dos painéis são apresentados no Quadro 7 e na Figura 6. A norma ANSI/A – 93 estabelece 17250 kgf cm⁻² como resistência mínima exigida para painéis de média densidade. Observa-se, de acordo com a média geral, que além do tratamento 1, 100% partículas de madeira, os painéis com menor percentual de plástico (20% de PEBD e PEAD) apresentaram valores médios superiores ao mínimo exigido pela norma, e foram significativamente superiores aos demais.

Quadro 7 - Valores médios de MOE (kgf cm⁻²)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 22.746 A a | 21.487 A a | 5,5 | 22.116 a |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 19.101 A b | 17.519 B b | 8,3 | 18.310 b |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 13.529 A d | 12.728 A c | 5,9 | 13.128 d |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 20.017 A b | 19.328 A b | 3,4 | 19.673 b |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 16.274 A cd | 14.596 B cd | 10,3 | 15.435 c |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 14.366 B cd | 17.573 A b | - 22,3 | 15.969 c |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 10.737 B e | 13.325 A cd | - 24,1 | 11.981 d |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

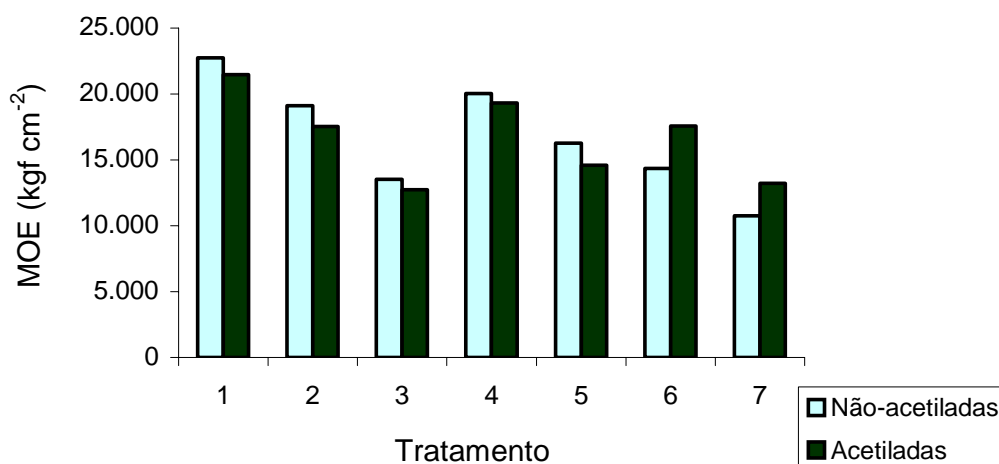


Figura 6 - Valores médios de MOE dos painéis (kgf cm⁻²).

De modo geral, a adição de plástico ou embalagens cartonadas na composição das partículas provocou redução no módulo de elasticidade. As chapas que apresentaram menores valores de MOE foram aquelas fabricadas com 40% de PEBD, PEAD ou embalagens cartonadas e partículas de madeira acetiladas ou não-acetiladas.

A acetilação promoveu redução significativa nos valores médios de MOE para todas as composições com madeira e com madeira e plástico. Entretanto, os painéis acetilados e com 20 ou 40% de embalagens cartonadas tiveram médias de MOE significativamente superiores à dos painéis não-acetilados. A acetilação das partículas de madeira promoveu aumento dos valores de MOE, nas chapas com embalagens cartonadas, na proporção de 22,3 e 24,1%, respectivamente, para 20 e 40% de partículas de embalagens cartonadas e madeira.

Entre os tratamentos com partículas acetiladas, somente os painéis com apenas madeira foram superiores aos demais, seguidos pelos painéis com 80% madeira. O acréscimo de plástico ou de embalagens cartonadas reduziu os valores de MOE, independentemente do tipo de partículas. Assim como ocorreu com o teste de MOR, a redução se deve à fraca adesão entre as partículas de madeira com o plástico ou com as embalagens cartonadas. Cabral (2005) também concluiu que a acetilação ocasiona redução das propriedades de flexão estática.

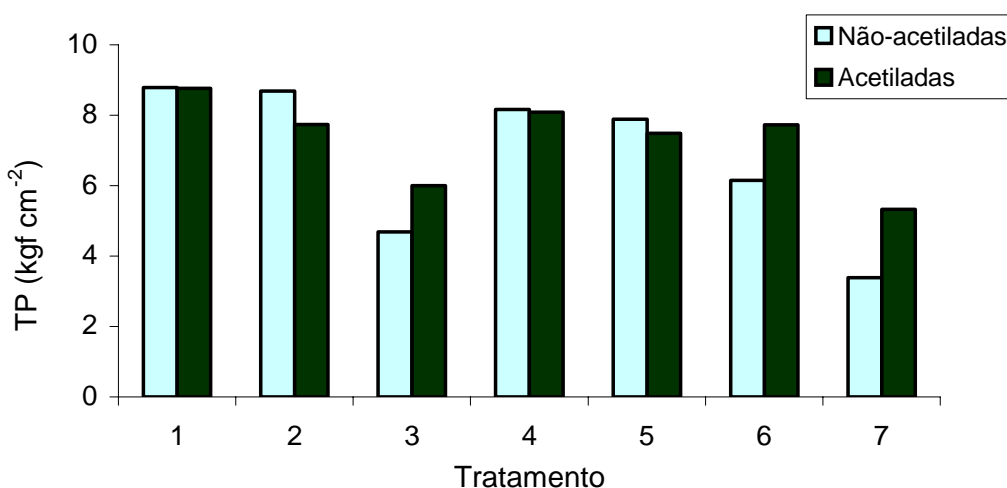
4.5. Tração perpendicular

A resistência à tração perpendicular avalia o grau de adesão entre as partículas dos diferentes materiais que constituem o painel, neste caso entre as partículas de madeira e plástico ou madeira e embalagens cartonadas. A ruptura normalmente ocorre na porção média da espessura, que corresponde à região de menor densidade e adesão entre as partículas (IWAKIRI, 1989). Por isso ele é considerado um dos testes mais importantes na avaliação da qualidade de chapas compostas. Os valores médios de tração estão apresentados no Quadro 8 e na Figura 7.

Quadro 8 - Valores médios de tração perpendicular (kgf cm^{-2})

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 8,79 A ab | 8,76 A ab | 0,3 | 8,77 a |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 8,69 A ab | 7,73 A abc | 11,0 | 8,21 ab |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 4,69 B cd | 6,01 A bc | - 28,1 | 5,35 c |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 8,16 A ab | 8,09 A ab | 0,9 | 8,13 ab |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 7,89 A abc | 7,49 A abc | 5,1 | 7,69 ab |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 6,15 B bcd | 7,72 A abc | - 25,5 | 6,94 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 3,39 B d | 5,35 A c | - 57,8 | 4,38 c |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

**Figura 7** - Valores médios de tração perpendicular (kgf cm^{-2}).

A norma ANSI/A – 93 estabelece uma resistência mínima de $4,0 \text{ kgf cm}^{-2}$ para o teste de tração perpendicular. De acordo com a média geral, apresentada no Quadro 8, todas as composições ficaram acima do exigido. Entretanto, a média dos painéis produzidos com 40% de partículas de embalagens cartonadas e madeira não-acetilada foi inferior ao mínimo. Chapas fabricadas apenas com partículas de madeira não-acetiladas, ou às quais foram adicionadas 20% de PEBD ou qualquer porcentual de PEAD, não diferiram entre si. Entre as chapas fabricadas com partículas acetiladas, apenas aquelas com 40% de PEBD ou 40% de embalagens cartonadas foram significativamente menos resistentes que as demais.

A média geral das composições indica que os painéis constituídos apenas por partículas de madeira apresentaram os maiores valores médios, entretanto sem apresentar diferença significativa em relação às composições com 20% de plástico e 40% de PEAD. Já as chapas fabricadas com partículas com 40% de PEBD e de embalagens cartonadas foram significativamente inferiores às demais.

A acetilação acarretou aumento na resistência à tração perpendicular das chapas com 20 e 40% de embalagens cartonadas e 40% de PEBD. Para as demais composições não houve diferença significativa. Entre as partículas acetiladas, todas as composições não apresentaram diferença significativa entre si, exceto a composição com 40% de embalagens cartonadas, estatisticamente inferior às composições 1 e 4, painéis apenas com partículas de madeira e com 20% de PEAD.

Para partículas não-acetiladas, o acréscimo de plástico e de embalagens cartonadas reduziu os valores médios de tração perpendicular, independentemente do tipo de partícula, o que pode ser atribuído à qualidade da adesão entre esses materiais, uma vez que a diminuição na proporção de madeira acarreta diminuição dos sítios das hidroxilas que reagem com o adesivo.

Milagres (2001), trabalhando com madeira e polietileno de baixa e de alta densidade, também concluiu que o acréscimo de plástico, em especial o PEBD, promove redução dos valores de tração. Isso pode ter ocorrido por algumas razões, como a taxa de compactação dos painéis, que é reduzida à medida que se acrescenta plástico. Com a redução da taxa de compactação, espera-se redução dos valores de tração perpendicular, já que as partículas serão menos compactadas.

4.6. Arrancamento de parafuso

A resistência ao arrancamento de parafuso é uma propriedade pouco estudada, entretanto de grande importância, em especial para atividades que necessitam ser pregadas ou parafusadas, como a produção de móveis (IWAKIRI, 1989). A norma ANSI/A - 93 estabelece que painéis de média densidade devem ter resistência de pelo menos 90 kgf. Os valores médios de arrancamento de parafuso estão no Quadro 9 e na Figura 8.

Quadro 9 - Valores médios de arrancamento de parafuso (kgf)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 136,38 B ab | 167,1 A ab | - 22,5 | 151,74 a |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 151,32 A ab | 133,96 B bc | 11,5 | 142,64 a |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 130,30 A b | 96,0 B d | 26,3 | 113,25 b |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 135,75 B ab | 160,89 A ab | - 18,5 | 148,32 a |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 149,12 A ab | 140,53 A bc | 5,8 | 144,82 a |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 129,62 B b | 149,07 A abc | - 15,0 | 139,35 a |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 102,62 B c | 128,30 A c | - 25,0 | 115,46 b |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

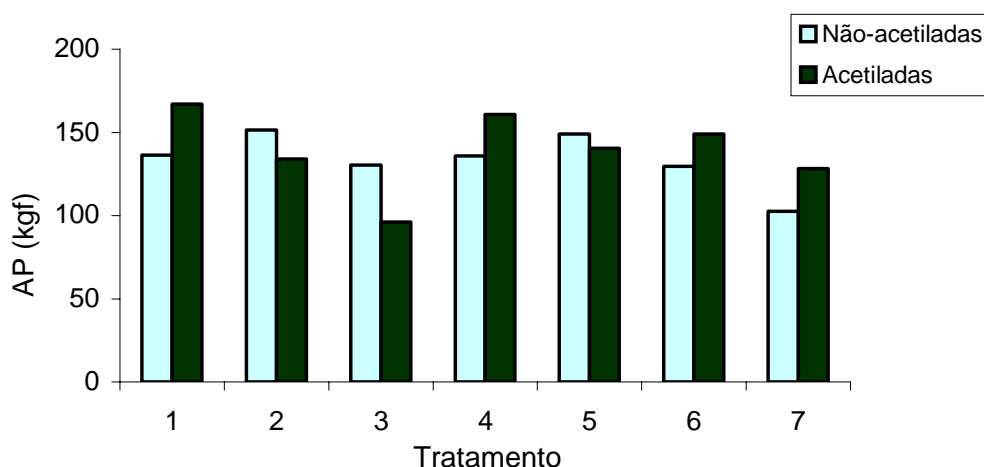


Figura 8 - Valores médios de arrancamento de parafuso (kgf).

A norma ANSI/A – 93 estabelece 90 kg como resistência mínima para o teste de arrancamento de parafuso, devendo ser ressaltado que neste experimento todos os painéis apresentaram média superior à exigida pela norma. Observa-se, de acordo com a média geral apresentada no Quadro 10, que os painéis produzidos com 100% madeira foram numericamente maiores que as demais chapas, contudo não se observou diferença significativa entre os valores médios das chapas com 80% madeira e 20% de outro material ou 60% madeira e 40% PEAD. A adição de 40% de PEBD e de embalagens cartonadas ocasionou redução significativa na resistência ao arrancamento de parafuso.

A acetilação das partículas ocasionou aumento na resistência das chapas contendo apenas madeira, 20% de PEAD ou embalagens cartonadas. Para as chapas com 40% PEAD, não houve diferença significativa, e para as chapas fabricadas com PEBD, 20 e 40%, a acetilação promoveu redução da resistência ao arrancamento de parafuso.

As chapas fabricadas com partículas acetiladas e contendo 100% madeira, 20% PEBD, 20 e 40% de PEAD e 20% de embalagens cartonadas foram iguais entre si. Contudo, aquelas com 100% madeira e madeira mais 20% PEAD, foram superiores às médias dos tratamentos 3 e 7, com 40% de PEBD e de embalagens cartonadas. Entre as partículas não-acetiladas, a composição com 40% de embalagens cartonadas foi significativamente inferior às das demais.

Assim como nas demais propriedades estudadas anteriormente, o acréscimo de material plástico dificulta a adesão entre os materiais, dado o caráter hidrofóbico dos plásticos (PEBD e PEAD) e hidrofílico da madeira. No caso de embalagens cartonadas, a geometria das partículas pode ter influenciado negativamente, uma vez que as partículas não apresentaram forma geométrica semelhante à de uma partícula de madeira, ou seja, não apresentava o coeficiente de esbeltez adequado. Além disso, dado a natureza higroscópica das fibras de papel do tetra pak, essas, à medida que aumenta seu conteúdo no painel, aumentam também a adsorção de adesivo, sendo um fator contrário a uma adesão de qualidade.

4.7. Dureza Janka

Esta propriedade é importante para utilizações em que os painéis sofrem pressão elevada em uma área reduzida, como em utilizações de assoalhos e pisos em geral. Os valores médios de dureza janka estão apresentados no Quadro 10 e na Figura 9. A norma ANSI/A - 93 estabelece que painéis classificados como de média densidade deve apresentar resistência mínima ao teste de dureza janka, $222,5 \text{ kgf cm}^{-2}$. Todos os valores ficaram acima do mínimo exigido pela norma.

Quadro 10 - Valores médios de dureza janka (kgf cm^{-2})

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 502,75 | 516,25 | - 2,7 | 509,5 a |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 496,0 | 436,75 | 11,9 | 466,38 b |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 401,75 | 389,62 | 3,0 | 395,69 c |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 526,25 | 495,17 | 5,9 | 510,71 a |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 554,25 | 489,77 | 11,6 | 522,01 a |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 453,25 | 476,77 | - 5,2 | 465,01 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 371,0 | 469,83 | -26,6 | 420,42 c |

Médias ao longo da coluna, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

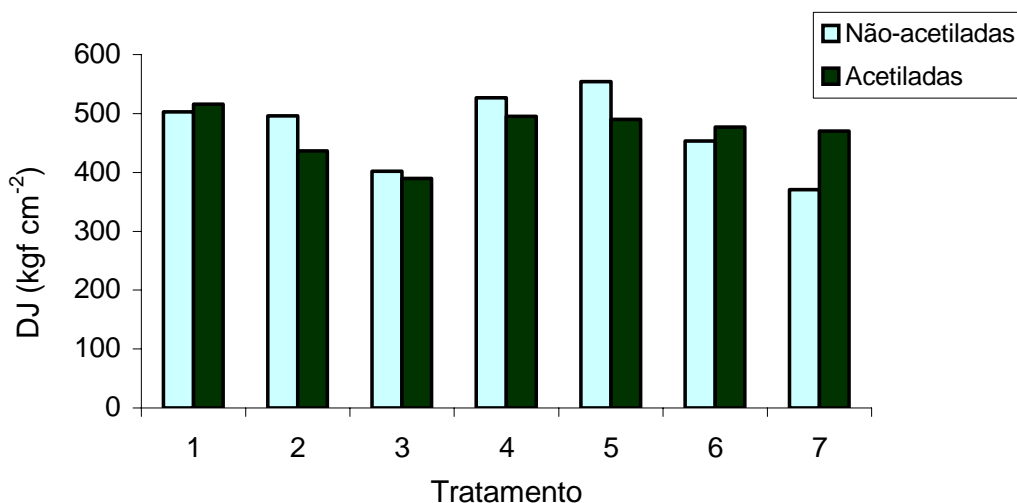


Figura 9 - Valores médios de dureza janka (kgf cm^{-2}).

A acetilação, apesar de não ter sido detectada diferença significativa, promoveu aumento nos valores médios das chapas com 20 e 40% de embalagens cartonadas, da ordem de 5,2 e 26,6%, respectivamente.

A acetilação não afetou essa propriedade, e apenas a composição de partículas interferiu de forma significativa nos resultados. As chapas cuja composição continham apenas madeira e madeira combinada com PEAD, nas proporções de 20 ou 40%, não apresentaram diferença entre si. Contudo, foram superiores aquelas com 20% de PEBD e de embalagens cartonadas, que, por sua vez, foram melhores que aquelas com 40% de PEBD e de embalagens cartonadas.

4.8. Compressão longitudinal

A propriedade compressão longitudinal normalmente é realizada em painéis de uso estrutural, como o OSB. Entretanto, é mais um parâmetro avaliado que auxilia na interpretação da qualidade dos painéis. Portanto, a norma ANSI/A - 93 não estipula valores mínimos para o teste de compressão longitudinal. Os valores médios de compressão longitudinal estão no Quadro 11 e Figura 10, sendo estatisticamente significativa apenas a composição das partículas. A acetilação não ocasionou diferença significativa.

Quadro 11 - Valores médios de compressão longitudinal (kgf cm^{-2})

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 114,7 | 123,2 | - 7,4 | 119,0 a |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 105,2 | 88,8 | 15,6 | 97,0 bc |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 79,2 | 74,9 | 5,4 | 77,0 d |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 107,5 | 109,4 | - 1,8 | 108,5 ab |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 96,6 | 96,7 | - 0,1 | 96,6 bc |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 92,2 | 92,6 | - 0,4 | 92,4 c |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 69,8 | 73,7 | - 5,6 | 71,8 d |

Médias ao longo da coluna, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

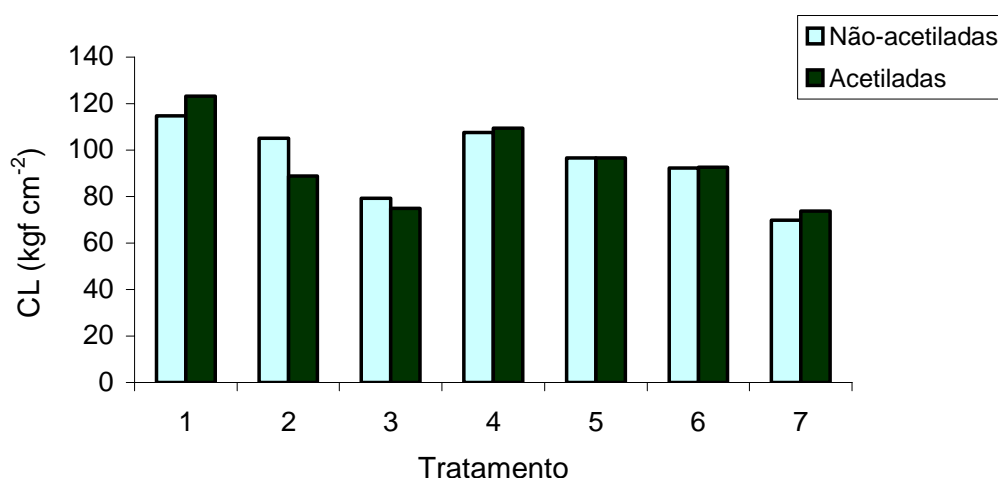


Figura 10 - Valores médios de compressão longitudinal (kgf cm^{-2}).

Os painéis compostos apenas por partículas de madeira apresentaram média igual à da composição com 20% de PEAD e superior à das demais. As composições contendo madeira com 20% de PEBD ou de embalagens cartonadas e madeira com 40% PEAD não apresentaram diferença entre as médias de compressão. Já as composições 3 e 7, com maior proporção de PEBD e embalagens cartonadas, apresentaram médias inferiores ao das demais composições. A acetilação promoveu, com exceção das chapas contendo PEBD, pequeno aumento numérico dos valores de compressão longitudinal.

4.9. Adsorção de umidade – 90% UR e 20 °C temperatura

Os valores médios de adsorção de umidade, quando os painéis passaram da condição de equilíbrio de 65% de umidade relativa para 90%, estão apresentados no Quadro 12 e na Figura 11. Observa-se que as chapas contendo plástico adsorveram menos umidade. Por outro lado, as chapas contendo embalagens cartonadas tiveram as maiores médias de adsorção de umidade. Houve interação significativa entre composição das partículas e tipo de partículas, e as médias foram desdobradas.

Além da acetilação, verificou-se também que aumento no percentual de plásticos promoveu redução da adsorção. Observando a média geral, verificou-se que os painéis com embalagens cartonadas apresentaram os maiores valores médios de adsorção, seguidos pelo painel composto apenas por partículas de madeira. Já os painéis produzidos com partículas de plástico, apresentaram as menores médias. Os painéis contendo PEBD, independentemente da proporção de 20 ou 40%, adsorveram significativamente menos vapor d'água que a contendo embalagens cartonadas. Esses resultados são um indicativo de que painéis produzidos com partículas de plástico são mais estáveis.

Exceto para as chapas com 40% de PEBD e PEAD, que não apresentaram diferença significativa, para as demais composições os tratamentos com partículas não-acetiladas promoveram maiores médias de absorção de umidade em porcentagem. Embora não tenha sido significativa a diferença entre os tipos de partículas para os tratamentos 3 e 5, com 40% de plástico,

estas apresentaram valores médios de adsorção inferiores aos painéis produzidos com partículas não-acetiladas, justamente devido à maior proporção deste material.

Quadro 12 - Valores médios de adsorção de umidade (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 2,28 A ab | 1,60 B ab | 29,8 | 1,94 ab |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 1,99 A ab | 1,47 B ab | 26,1 | 1,73 b |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 1,77 A b | 1,57 A ab | 11,3 | 1,67 b |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 2,03 A ab | 1,67 B a | 17,7 | 1,85 ab |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 1,92 A ab | 1,73 A ab | 9,9 | 1,82 ab |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 2,21 A ab | 1,83 B ab | 17,2 | 2,02 a |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 2,27 A ab | 1,59 B ab | 30,0 | 1,97 ab |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

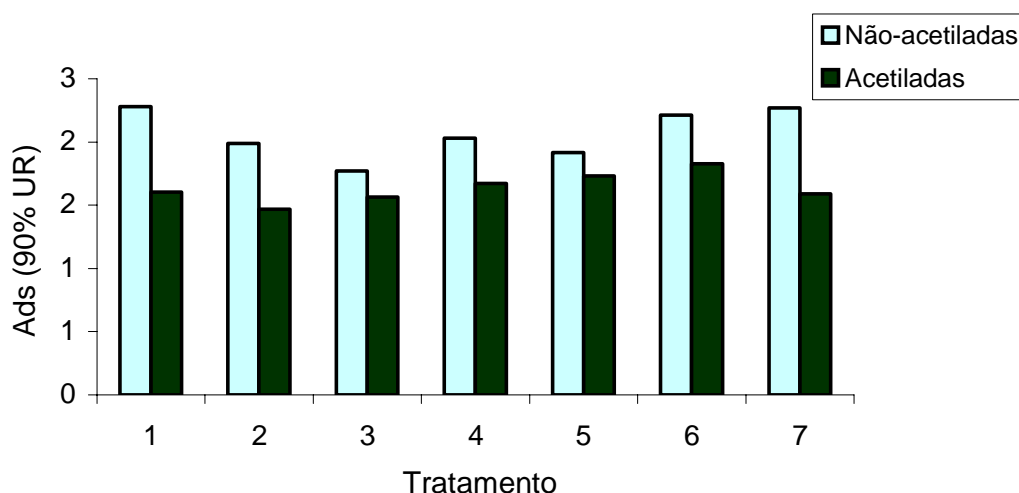


Figura 11 - Valores médios de adsorção de umidade (%).

Portanto, a acetilação promoveu o bloqueio dos sítios de hidroxilas, responsáveis pela higroscopicidade da madeira e os painéis produzidos com partículas acetiladas adsorveram menor teor de umidade. Além disso, há uma tendência de os painéis com maior conteúdo de plástico interagirem menos com a água, uma vez que contêm menor quantidade de material higroscópico.

4.10. Absorção de água – 2 horas de imersão

Os valores médios de absorção de água dos painéis, após 2 horas de imersão, estão apresentados no Quadro 13 e na Figura 12. Observa-se que os painéis com 40% PEAD apresentaram a menor média de absorção de água, sendo significativamente inferior à média apresentada pelos tratamentos compostos de 80% madeira e 20% PEAD, que, por sua vez, foi igual aos painéis fabricados com 40% PEBD.

Quadro 13 - Valores médios de absorção de água, após 2 horas de imersão (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 24,98 A cd | 16,98 B cd | 32,0 | 20,98 d |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 21,10 B cde | 30,10 A b | - 29,9 | 25,60 c |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 18,82 A de | 20,58 A cd | - 9,4 | 19,70 de |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 15,78 A de | 17,71 A cd | - 12,2 | 16,74 e |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 11,41 A e | 11,92 A d | - 4,5 | 11,67 f |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 62,93 A b | 33,36 B b | 47,0 | 48,15 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 73,65 A a | 46,22 B a | 37,2 | 59,93 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

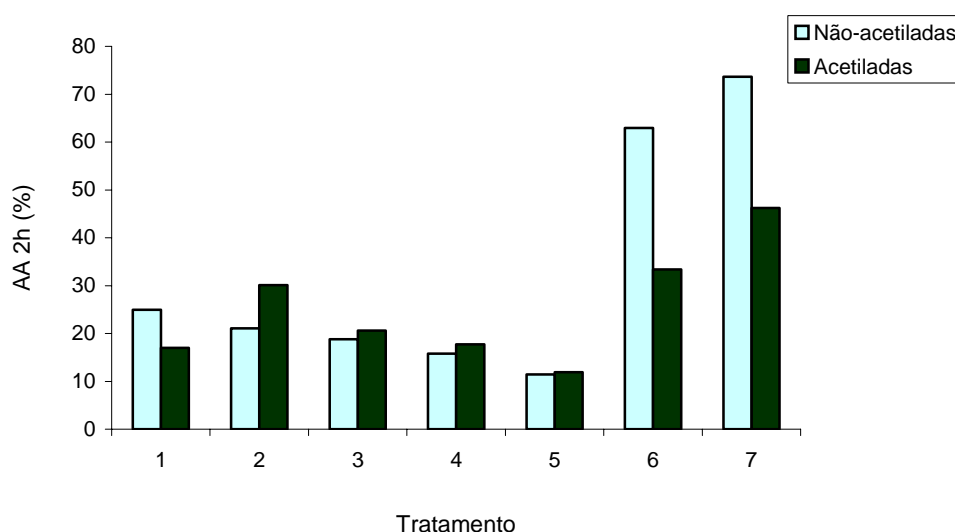


Figura 12 - Valores médios de absorção de água, após 2 horas de imersão (%).

Os painéis contendo embalagens cartonadas apresentaram as maiores médias de absorção de água. Os valores médios de absorção, das composições com 20 e 40% de embalagens cartonadas, foram muito superiores ao dos demais, com média geral de 48 e 60% de absorção de água, respectivamente.

A acetilação promoveu redução na absorção dos painéis fabricados apenas com partículas de madeira, 20 e 40% de embalagens cartonadas. Nas composições acetiladas com 40% de PEBD e 20 ou 40% de PEAD, não houve diferença significativa. A redução proporcionada pela utilização de partículas de madeira acetiladas ocasionou redução média de absorção das chapas de 47 e 37,2% para chapas com 20 e 40% de embalagens cartonadas, respectivamente.

Assim, nas chapas fabricadas com partículas acetiladas, as médias de absorção foram bem inferiores em relação às não-acetiladas, em especial com as embalagens cartonadas. Contudo, as chapas fabricadas com embalagens cartonadas tiveram elevadas taxas de absorção, sendo significativamente superiores à de outras composições. Verificou-se que, também entre as partículas acetiladas, a composição com 40% de PEAD apresentou o melhor resultado, gerando painéis mais estáveis. Não foi verificada diferença entre a utilização de 20 ou 40% de PEAD.

Nos painéis fabricados com partículas não-acetiladas, o tratamento composto por 40% de PEAD apresentou a menor média de absorção, que foi igual às outras três composições contendo plástico, 20% de PEBD e PEAD e 40% de PEBD. As chapas contendo embalagens cartonadas, por sua vez, apresentaram elevadas taxas de absorção.

4.11. Absorção de água – 24 horas de imersão

Os valores médios de absorção de água, após 24 horas de imersão, estão apresentados no Quadro 14 na Figura 13.

Conforme pode ser observado no Quadro 14, o tratamento 5, com 40% de PEAD, foi mais estável no teste de absorção após 24 horas de imersão, independentemente do tipo de partícula. Todos painéis produzidos com partículas acetiladas absorveram significativamente menos água que os produzidos com partículas não-acetiladas, devendo ser ressaltado que no tratamento 1,

contendo apenas partículas de madeira, por exemplo, com o uso de partículas acetiladas, a redução na taxa de absorção de água caiu quase pela metade, 46,1%.

Quadro 14 - Valores médios de absorção de água, após 24 horas de imersão (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 60,82 A bc | 32,77 B b | 46,1 | 46,79 c |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 52,87 A c | 37,94 B b | 28,2 | 45,41 cd |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 51,52 A c | 30,44 B b | 40,9 | 40,98 d |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 55,29 A bc | 31,71 B b | 42,6 | 43,50 cd |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 30,93 A d | 22,75 B c | 26,4 | 26,84 e |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 75,21 A a | 47,63 B a | 36,7 | 61,42 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 81,90 A a | 53,99 B a | 34,1 | 67,94 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

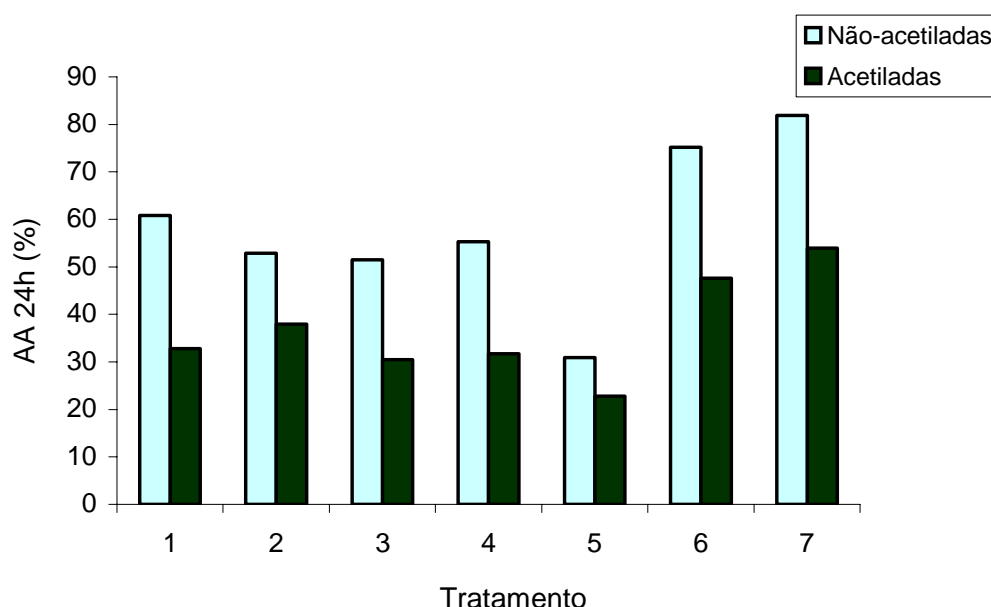


Figura 13 - Valores médios de absorção de água, após 24 horas de imersão (%).

Independentemente da utilização de partículas acetiladas ou não-acetiladas, os painéis com embalagens cartonadas absorveram significativamente mais água que os demais para os dois tipos de partículas, entretanto quando

foram utilizadas partículas acetiladas, a absorção foi reduzida em 36,7 e 34,1%, para chapas produzidas com 20 e 40% de embalagens cartonadas, respectivamente.

O acréscimo de 20 para 40% de PEAD promoveu redução significativa na absorção, após 24 horas de imersão. Entre as chapas com 20 e 40% de PEBD, respectivamente, não se observou diferença significativa para absorção. Estes valores são coerentes, pois o PEAD tem se mostrado a matéria-prima, dentre as estudadas, que possibilita painéis mais estáveis dimensionalmente. Esses resultados são coerentes com os encontrados por outros autores que trabalharam com madeira e plástico, como Milagres (2001), que concluiu que o PEAD possibilita painéis de alta estabilidade.

4.12. Inchamento em espessura - 90% UR e 20 °C temperatura

Os valores médios de inchamento em espessura, proporcionado pelo aumento da umidade relativa de 65 para 90%, estão no Quadro 15 e na Figura 14. Observa-se, pela média geral, que assim como nos testes absorções de água, no teste de inchamento os painéis com 40% PEAD tiveram a menor média de inchamento, ou seja, painéis mais estáveis.

Para as chapas fabricadas com partículas não-acetiladas, aquelas com PEBD e 40% de PEAD apresentaram médias de inchamento significativamente inferiores à das demais chapas. As chapas menos estáveis foram fabricadas com 100% de partículas de madeira ou com 20 ou 40% de embalagens cartonadas. Mais uma vez, as composições com plástico apresentam-se mais estáveis, conforme resultados de outros pesquisadores, como Milagres (2001) e Cabral (2001).

A acetilação reduziu de forma significativa o inchamento em espessura, independentemente da composição das partículas. Constatou-se que as composições contendo embalagens cartonadas, independentemente da proporção de 20 ou 40%, promoveram elevadas médias de inchamento. Para as demais composições não se observou diferença entre elas. De certa forma, esses resultados eram esperados, uma vez que materiais plásticos, por serem hidrofóbicos, não promovem aumento de massa, nem de dimensões. Contudo, as embalagens cartonadas caracterizam-se por ser um material higroscópico,

ou seja, têm sítios de interação com moléculas de água, que acarreta ganho de massa e de dimensões.

Quadro 15 - Valores médios de inchamento em espessura (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 2,12 A a | 0,30 B b | 85,8 | 1,21 b |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 1,55 A b | 0,25 B b | 83,9 | 0,90 c |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 1,17 A b | 0,24 B b | 79,5 | 0,70 c |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 2,16 A a | 0,24 B b | 88,9 | 1,20 b |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 1,19 A b | 0,14 B b | 88,2 | 0,67 c |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 2,12 A a | 0,81 B a | 61,8 | 1,46 ab |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 2,09 A a | 0,95 B a | 45,5 | 1,52 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

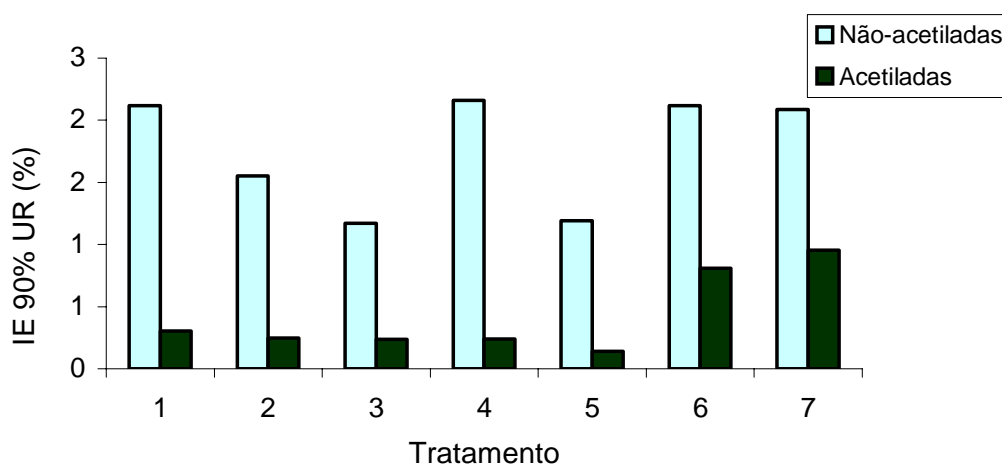


Figura 14 - Valores médios de Inchamento em espessura (%).

4.13. Inchamento em espessura – 2 horas de imersão

Os valores médios de inchamento em espessura (%), após 2 horas de imersão em água, estão no Quadro 16 e na Figura 15. Observa-se que os valores de inchamento foram fortemente influenciados pela composição das partículas e pela acetilação, que reduziram drasticamente o percentual de inchamento dos painéis.

Quadro 16 - Valores médios de inchamento em espessura, após 2 horas de imersão (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 10,10 A cd | 1,22 B bc | 87,9 | 5,66 c |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 8,27 A d | 1,12 B c | 86,5 | 4,70 c |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 6,18 A e | 0,90 B c | 85,4 | 3,54 d |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 8,62 A cd | 1,18 B bc | 86,3 | 4,90 c |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 3,28 A f | 0,70 B c | 78,7 | 1,99 e |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 14,46 A b | 2,64 B bc | 81,7 | 8,55 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 17,40 A a | 5,56 B a | 68,0 | 11,48 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

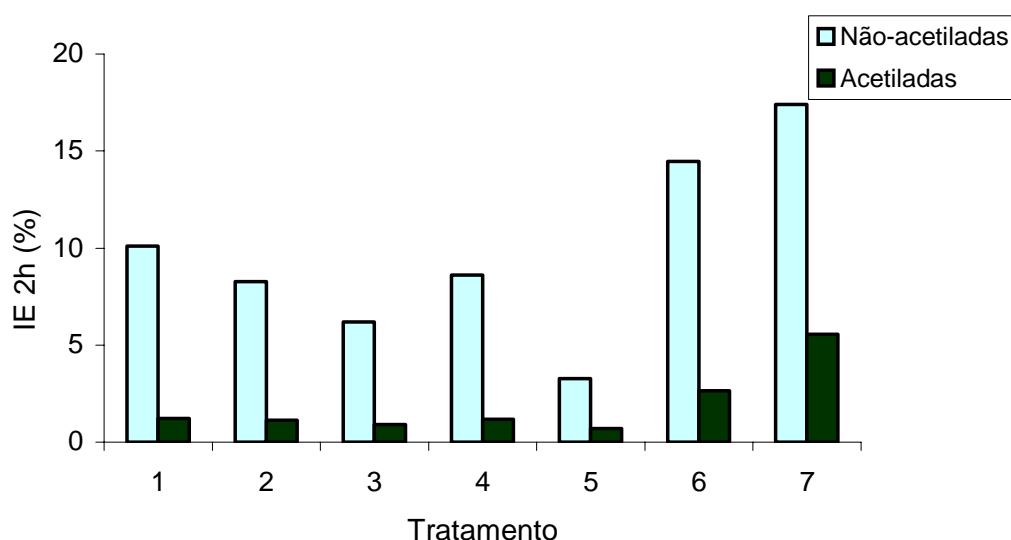


Figura 15 - Valores médios de inchamento em espessura, após 2 horas de imersão (%).

Observa-se, pela média geral, que as chapas contendo embalagens cartonadas tiveram maior inchamento, sendo significativamente menos estáveis que as demais composições, em especial para aquelas com 40% de embalagens cartonadas. Em oposição a este comportamento, as chapas com 40% PEAD foram significativamente mais estáveis que as demais.

Assim como no inchamento em espessura ocasionado pela adsorção de vapor d'água, a acetilação reduziu o inchamento em todas as chapas. Tanto

para chapas fabricadas com partículas acetiladas ou não-acetiladas, aquelas com 40% de embalagens cartonadas tiveram inchamento significativamente maior que as demais composições. Em seguida aparecem as chapas com 20% de embalagens cartonadas e 100% madeira.

Nas composições com plásticos, em especial na proporção de 40%, tratamentos 3 e 5, verificam-se as menores médias de inchamento, ou seja, quanto mais plástico, maior a estabilidade dos painéis, devendo ser ressaltado que no caso das partículas não-acetiladas essas composições foram significativamente mais estáveis que as demais.

4.14. Inchamento em espessura – 24 horas de imersão

O Quadro 17 e a Figura 16 mostram as médias de inchamento em espessura após 24 horas de imersão dos painéis em água.

Assim como nos testes anteriores de inchamento em espessura, observa-se, de acordo com a média geral, que as chapas com 40% de plástico foram significativamente mais estáveis do que aquelas com 20% de plástico, que, por sua vez, foram mais estáveis que a madeira pura. As chapas menos estáveis foram aquelas contendo embalagens cartonadas, independentemente da proporção.

Entretanto, avaliando o desdobramento das médias, observa-se que a acetilação possibilitou a produção de painéis mais estáveis em todas as composições e que as chapas contendo plástico foram mais estáveis que, principalmente, as composições com embalagens cartonadas, que apresentaram as médias mais elevadas de inchamento.

Para as chapas fabricadas com partículas não-acetiladas, maiores teores de plástico reduzem significativamente o inchamento. Para chapas com partículas acetiladas, não se verificou diferença significativa entre as composições contendo plástico.

A norma CSA – 93 estabelece 15% como o inchamento máximo admissível para painéis de média densidade, após 24 horas de imersão em água. Assim como no teste de 2 horas de imersão em água, em que os painéis com apenas partículas de madeira e os com embalagens cartonadas apresentaram valores superiores ao permitido. No teste de 24 horas de imersão, esses

mesmos painéis também apresentaram médias de inchamento superiores à permitida. A composição com 20% de PEAD ficou no limite deste valor.

Quadro 17 - Valores médios de inchamento em espessura, após 24 horas de imersão (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 18,52 A b | 2,27 B c | 87,7 | 10,40 b |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 13,43 A c | 1,87 B c | 86,1 | 7,65 c |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 8,72 A d | 1,66 B c | 81,0 | 5,19 d |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 15,04 A c | 2,02 B c | 86,6 | 8,53 c |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 6,86 A e | 1,49 B c | 78,3 | 4,17 d |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 21,52 A a | 4,27 B b | 80,2 | 12,89 a |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 21,13 A a | 6,98 B a | 67,0 | 14,06 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

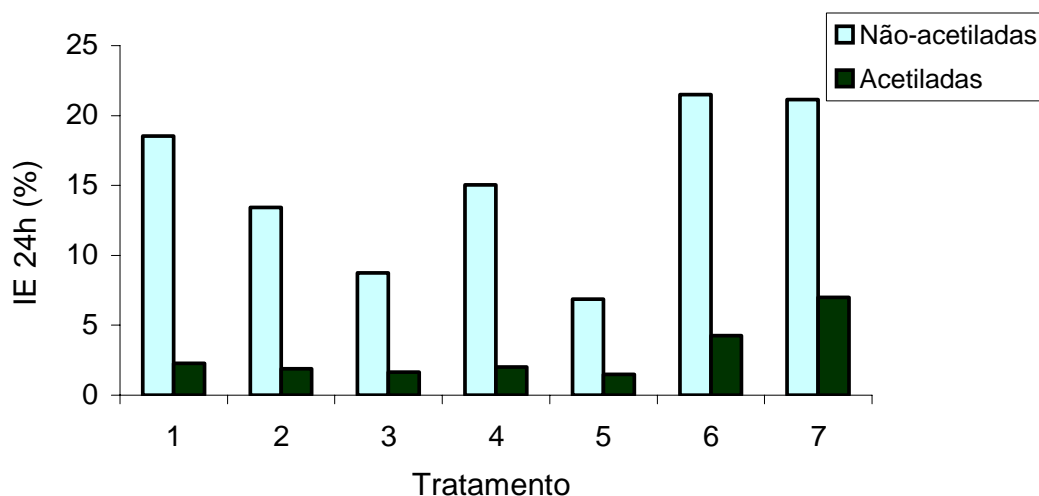


Figura 16 - Valores médios de inchamento em espessura (%), após 24 horas de imersão (%).

4.15. Expansão linear - 90% UR e 20 °C temperatura

A expansão linear, após equilíbrio entre 65 e 90% de umidade relativa e 20 °C de temperatura, foi afetada pela composição e pelo tipo das partículas. A interação entre estes dois fatores foi significativa. Os valores médios de expansão linear estão apresentados no Quadro 18 e na Figura 17.

Quadro 18 - Valores médios de expansão linear (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|----------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 0,05 A bc | 0,04 A a | 20,0 | 0,043 bc |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 0,05 A bc | 0,03 B a | 40,0 | 0,043 bc |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 0,05 A bc | 0,04 A a | 20,0 | 0,044 bc |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 0,05 A bc | 0,04 A a | 20,0 | 0,045 bc |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 0,03 A c | 0,03 A a | 0,0 | 0,029 c |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 0,06 A bc | 0,04 B a | 33,3 | 0,053 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 0,10 A a | 0,05 B a | 50,0 | 0,075 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

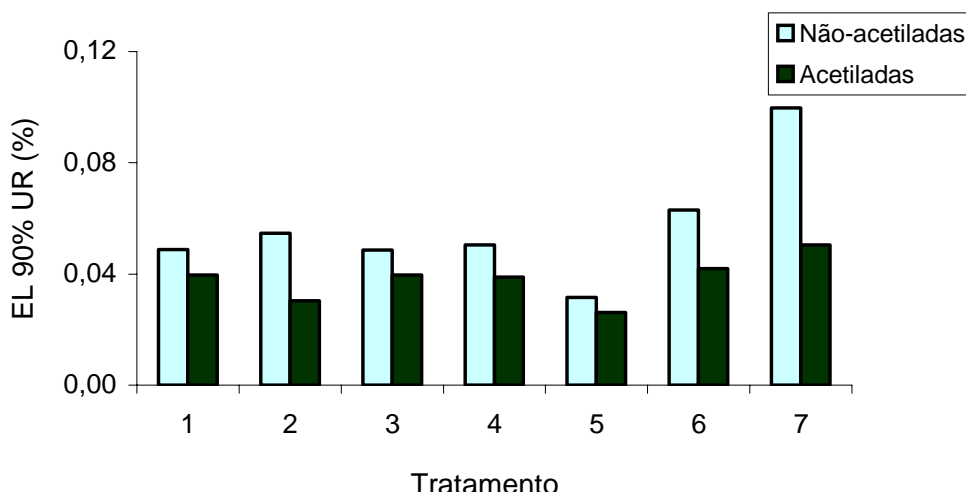


Figura 17 - Valores médios de expansão linear (%).

Conforme pode ser observado no Quadro 18, a acetilação reduziu de forma significativa a expansão linear das chapas. Entre as chapas fabricadas com partículas não-acetiladas, apenas aquelas com 40% de embalagens cartonadas foram significativamente menos estáveis que as demais. No caso das chapas com 40% de embalagens cartonadas, a acetilação ocasionou a redução de 50% da expansão linear, em relação às chapas produzidas com partículas não-acetiladas.

Para chapas fabricadas com partículas acetiladas não houve diferença entre elas. Considerando a média geral, observa-se que a chapa mais estável foi aquela com 40% de PEAD.

4.16. Expansão linear – 2 horas de imersão

Os valores médios de expansão linear estão apresentados no Quadro 19 e na Figura 18.

Quadro 19 - Valores médios de expansão linear, após 2 horas de imersão (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 0,08 A c | 0,07 A b | 12,5 | 0,078 c |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 0,07 A c | 0,07 A b | 0,0 | 0,072 c |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 0,06 A c | 0,07 A b | - 16,7 | 0,064 c |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 0,07 A c | 0,06 A b | 14,3 | 0,063 c |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 0,06 A c | 0,06 A b | 0,0 | 0,059 c |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 0,17 A b | 0,08 B ab | 47,1 | 0,130 b |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 0,22 A a | 0,12 B ab | 45,5 | 0,170 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

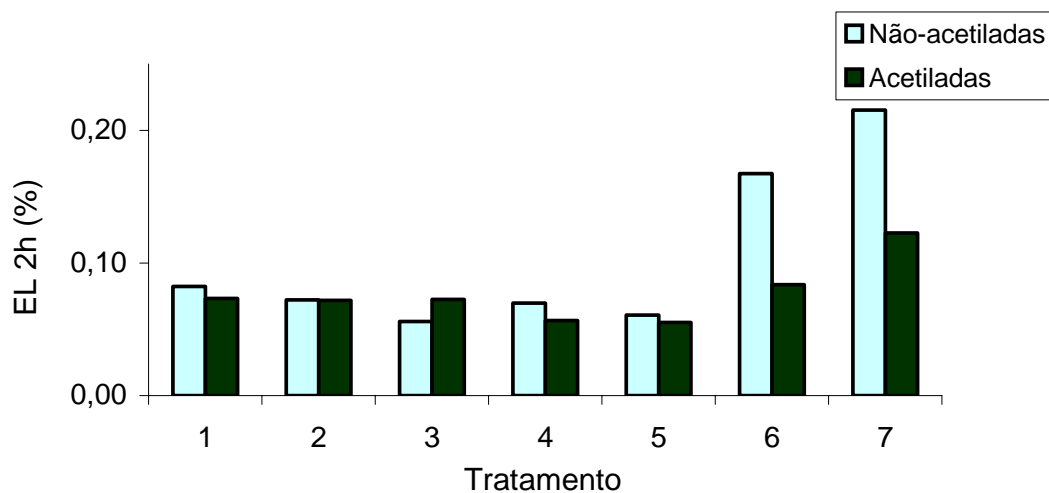


Figura 18 - Valores médios de expansão linear, após 2 horas de imersão (%).

Não se observou diferença significativa entre as chapas contendo partículas de madeira acetiladas. Contudo, de acordo com a média geral, nas chapas produzidas com partículas acetiladas ou não-acetiladas observou-se que as chapas contendo embalagens cartonadas foram menos estáveis que as demais, em especial quando foram utilizadas 40% de embalagens cartonadas.

Comparando chapas fabricadas com partículas acetiladas e não-acetiladas, observa-se que a acetilação promoveu a redução dos valores médios de expansão em quase 50% nos tratamentos 6 e 7, com 20 e 40% de embalagens cartonadas, respectivamente. Nos demais tratamentos, não se verificou diferença significativa.

4.17. Expansão linear – 24 horas de imersão

Os valores médios de expansão linear, após 24 horas de imersão, estão apresentados no Quadro 20 e na Figura 19. Tanto a composição das partículas quanto o tipo de partícula, além da interação entre estes dois fatores, foram significativos.

De acordo com a média geral, as chapas com 40% de embalagens cartonadas apresentaram os maiores valores de expansão, sendo significativamente igual às chapas com 20% de embalagens cartonadas, que, por sua vez, também foram iguais às chapas fabricadas apenas com partículas de madeira. Todas as chapas contendo plástico, independentemente do tipo e da proporção, 20 ou 40%, não apresentaram diferença estatística significativa entre si.

A acetilação reduziu significativamente os valores médios de expansão nas chapas produzidas com embalagens cartonadas. Nas demais chapas produzidas com partículas acetiladas, não houve diferença significativa, apesar de as partículas acetiladas apresentarem as menores médias. Observou-se ainda que as chapas com 40% de PEAD apresentaram a menor média de expansão linear.

Ainda de acordo com o Quadro 20, verifica-se diferença significativa em função do tipo de partícula utilizada, apenas nas composições contendo embalagens cartonadas e partículas não-acetiladas, que apresentaram valores médios de expansão, maior que os valores das demais composições. Os valores médios de expansão das chapas com embalagens cartonadas foram praticamente o dobro dos valores das demais chapas.

A norma CSA – 93 preconiza 0,35% como expansão linear máxima admissível. Todas as chapas expandiram-se menos que o permitido, portanto dentro do limite aceitável pela norma.

Quadro 20 - Valores médios de expansão linear, após 24 horas de imersão (%)

| Tratamento | Tipo de Partícula de Madeira | | Alteração ^{1/} (%) | Média Geral |
|----------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-------------|
| | Não-acetiladas | Acetiladas | | |
| 1 – 100% Mad | 0,12 A b | 0,11 A ab | 8,33 | 0,114 bc |
| 2 – 80% Mad/20% PEBD | 0,11 A b | 0,10 A ab | 9,1 | 0,108 c |
| 3 – 60% Mad/40% PEBD | 0,12 A b | 0,10 A ab | 16,7 | 0,110 c |
| 4 – 80% Mad/20% PEAD | 0,11 A b | 0,09 A ab | 18,2 | 0,104 c |
| 5 – 60% Mad/40% PEAD | 0,08 A b | 0,07 A b | 12,5 | 0,072 c |
| 6 – 80% Mad/20% EC | 0,21 A a | 0,11 B ab | 47,6 | 0,158 ab |
| 7 – 60% Mad/40% EC | 0,23 A a | 0,14 B ab | 39,1 | 0,186 a |

Médias ao longo da mesma linha, seguidas da mesma letra maiúscula, e ao longo das colunas, seguidas da mesma letra minúscula, não apresentam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em que Mad = madeira; PEBD = polietileno de baixa densidade; PEAD = polietileno de alta densidade; e EC = embalagem cartonada. ^{1/} (não-acetiladas - acetiladas)/não-acetiladas.

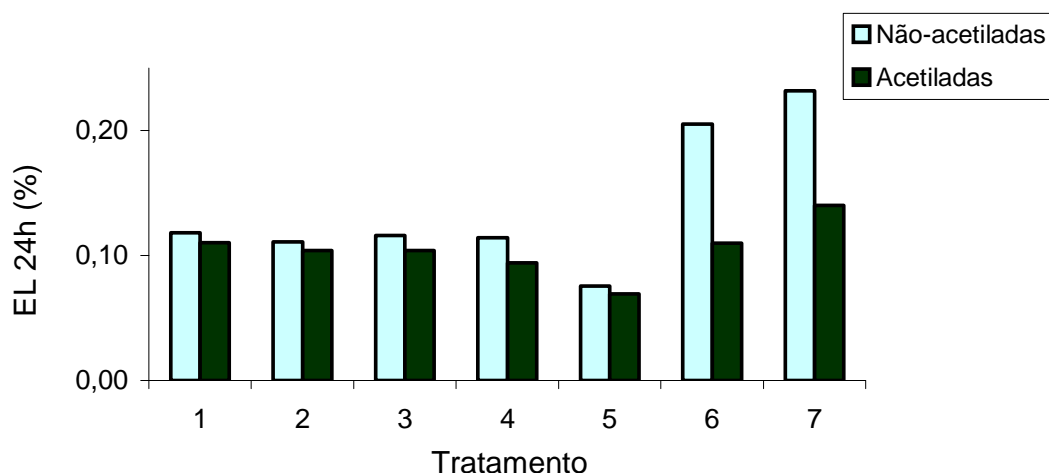


Figura 19 - Valores médios de expansão linear, após 24 horas de imersão (%).

5. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a acetilação das partículas de madeira, bloqueando os sítios de adsorção presentes na estrutura da madeira, proporcionou a produção de painéis de elevada estabilidade dimensional, em relação aos painéis produzidos com partículas não-acetiladas, em especial para os painéis produzidos com 20 ou 40% de embalagens cartonadas.

Entretanto, verificou-se também que a produção de chapas com partículas de madeira acetiladas, de modo geral, provocou a redução de algumas propriedades mecânicas, principalmente na resistência à flexão estática: módulo de ruptura e módulo de elasticidade. Em geral, a acetilação proporcionou painéis com boa estabilidade dimensional, porém com menor resistência mecânica.

Analisando a composição das partículas, verificou-se que painéis contendo plástico são mais estáveis do que os painéis com apenas madeira, que por sua vez foram mais estáveis que os painéis com embalagens cartonadas, independentemente do tipo de partícula, acetilada ou não acetilada. O acréscimo no percentual de plástico possibilitou painéis mais estáveis, reduzindo os valores médios de umidade de equilíbrio, de adsorção e absorção de água, de inchamento em espessura e expansão linear. Entretanto, de modo geral, os valores médios de resistência também diminuíram com o acréscimo de plástico.

Verificou-se também que o acréscimo de embalagens cartonadas ocasionou o inverso; painéis com elevada instabilidade dimensional, devido à higroscopicidade do papel contido nas embalagens cartonadas, aumentando os valores médios de umidade de equilíbrio, de adsorção e absorção de água, de inchamento em espessura e expansão linear, ou seja, resultou em painéis com maior variabilidade dimensional que os produzidos apenas com partículas de madeira.

Os painéis com partículas de plástico, PEAD ou PEBD, promoveram as menores taxas de variação dimensional, em especial o PEAD. Chapas produzidas com 40% de plástico proporcionaram menores valores de absorção de água, inchamento em espessura e expansão linear que as chapas com 20% de plástico, ou seja, a estabilidade da chapa aumentou à medida que aumentou a quantidade de plástico, dado o caráter hidrofóbico deste material.

Os painéis contendo embalagens cartonadas apresentaram elevadas taxas de variação dimensional. Nos testes de absorção e adsorção de água, inchamento em espessura e expansão linear, à medida que foram acrescentadas embalagens cartonadas, aumentaram-se os valores médios de variação dimensional.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, concluiu-se que o PEAD é a melhor matéria-prima, dentre as estudadas, para produção de compósitos de partículas combinadas com madeira. É válido ressaltar que, apesar de apresentar as menores médias de resistência mecânica e elevadas médias de instabilidade dimensional, os compósitos com embalagens cartonadas devem ser mais estudados, em especial a densidade, a espessura da chapa, o teor de adesivo e a geometria das partículas.

Os compósitos produzidos a partir dessa tecnologia, partículas de madeira combinadas com partículas de plástico ou embalagens cartonadas por termocompressão, apresentaram propriedades satisfatórias, e essa tecnologia pode viabilizar a reciclagem de materiais pós-consumo.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V.F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 158-166, 2000.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Mat-formed wood particleboard:** Specification. ANSI/A 208.1 – 1993. 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: 1991. (Annual Book of ASTM Standards).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA. **Relatório Setorial**. São Paulo: 2002. 22 p.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E SOCIAL – BNDES. **Produtos Florestais**. Área de operações industriais. Gerência Setorial 1, Brasília: 2002. 7 p.

BURGER, M. L.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel. 1991. 154 p.

CABRAL, C. P. T. **Propriedades de chapas do tipo aglomerado e OSB, fabricadas com partículas e flocos de *E. grandis*, *E. Urophylla*, *E. cloeziana* e *Pinus ellioti***. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) –Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

CARVALHO, L. H. **Compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais**. Disponível em: <www.abpol.com.br/apostilacompositos.doc>. Acesso em: 4 fev. 2003.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE.
Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: 10 jul. 2005.

CONTESINI, H. Reutilizando o PET. **Revista Ação Ambiental**, n. 17, p. 18-19, 2001.

CORREA, C. A.; FONSECA, C. N. P.; NEVES, S.; RAZZINO, C. A.; HAGE, E. Compósitos termoplásticos com madeira. **Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 3, p. 154-165, 2003.

COSTA, D. M. L. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de compósitos plástico-madeira fabricados por termo-compressão, com partículas de eucalipto, polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS)**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

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.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION – CSA. OSB and Waferbord. Ontário: CSA 0437 – 93, 1993. 18 p.

ENGLISH, B.; CLEMONS, C. M.; SARK, N.; SCHNEIDER, J. P. **Waste-wood - derived fillers for plastics**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-91. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1996. 15 p.

FALK, R. H.; VOS, D.; CRAMER, S. M. The comparative performance of woodfiber-plastic and wood- based panels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WOODFIBER-PLASTIC COMPOSITES, 5., 1999. **Proceedings...** Madison: 1999. p. 269-274.

HAN, G. S.; ICHINOSE, H.; TAKASE, S.; SHIRAIISHI, N. Composites of wood and polypropylenes III. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 35, p. 1100-1104, 1989.

INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DA HABITAÇÃO ECOLÓGICA – IDHEA. Disponível em: <www.idhea.com.br>. Acesso em: 18 abr. 2005.

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

IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira**. 2.ed. Curitiba: FUPEF, 2003. 120 p. (Série didática, 3)

KOKTA, B. V.; MALDAS, D. Influence of phthalic anhydride as a compatibilizing agent on the mechanical behavior of wood fiber-polystyrene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 41, p. 185-194, 1990.

KRASSIG, A. Cellulose: structural, accessibility and reativity. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers, 1993. p. 287-298.

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

LIANG, B. H.; MOTT, L.; SHALER, S. M.; CANEBA, G. Properties of transfer-molded wood-fiber/Polystyrene composites. **Wood and Fiber Science**, v. 26, n. 3, p. 383-389, 1994.

MACIEL, A. S. **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de *Pinus elliottii* Engelm., *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, Poliestireno (PS) e Polietileno Tereftalato (PET)**. 2001. 118 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 696 p.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Polímeros**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.

MENDES, L. M. *Pinus* spp. Na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). Curitiba: UFPR, 2001. 156 p.

MILAGRES, E. G. **Compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polipropileno e polietileno de alta e de baixa densidade**. 2001. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. Volume 1: Materials. Carbondale: Souther Illinois University Press, 1974. 244 p.

OKINO, E.Y.A.; ANDAHUR, J. P. V.; SANTANA, M. A. E.; SOUZA, M. R. Resistência físico-mecânica de chapas aglomeradas de bagaço de cana-de-açúcar modificado quimicamente. **Revista Scientia Forestalis**, n. 52, p. 35-42, 1997.

OLIVEIRA, F. V.; VITAL, B. R.; COSTA, D. M. L. Efeito do tratamento das partículas de polietileno tereftalato (PET) com ultra-som e microondas para produção de compósitos termoplásticos com madeira. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2003, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: SIC, 2003. (CD-ROM).

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. NewYork: MacGraw-Hill, 1980. 722 p.

REVISTA DA MADEIRA – REMADE. Disponível em: <www.remade.com.br>. Acesso em: 10 jul. 2005.

ROWELL, R. M. Results of chemical modification of lignocellulosic fibers for use in composites. In: Wood-fiber polymer composites, 1, 1993, Madison. process, and material options. **Proceedings ...** Madison, WI And 45th annual meeting of Forest Products Society; New Orleans, LA. Madison, WI: Forest Products Society; 1993. p. 121-127.

ROWELL, R. M.; TILLMANN, A. M.; SIMONSON, R. A simplified procedure for the acetylation of hardboard and softwood flakes for flakeboard production. **Journal of Wood Chemistry Technology**, v. 6, p. 427-448, 1986.

SIMONSEN, J.; JACOBSON, R.; ROWELL, R. Properties of styrene-maleic anhydride copolymers containing wood-based fillers. **Forest Products Journal**, v. 48, n. 1, p. 89-92, 1998.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry** – fundamentals and applications. San Diego: Academic Press, 1993. 293 p.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. Tecnologia de reciclagem de polímeros. **Revista Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

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

TETRA PAK. Disponível em: <www.tetrapak.com.br>. Acesso em: 10 maio 2004.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties and utilization**. New York: Van Nostrand Reinold, 1991. 441 p.

VICK, C. B.; KRZYSIK, A.; WOOD JR., J. E. **Acetylated, isocyanate-bonded flakeboards after accelerated aging**. Holz als Roh. Berlin: Springer-Verlag, n. 49, p.221-228, 1991.

VITAL, B. R.; HASELEIN, C. R.; LUCIA, R. M. Efeito da geometria das partículas nas propriedades das chapas de madeira aglomerada de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden). **Revista Árvore**, v. 16, n. 1, p. 88-96, 1992.

VITAL, B. R.; WILSON, J. B. Efeito da forma geométrica dos flocos e partículas da densidade das chapas e do tipo de adesivo nas propriedades mecânicas das chapas de madeira aglomerada. **Revista Árvore**, v. 4, n. 2, p. 179-189, 1980.

WANAGE, HATANO, Y.; SHIBUSAWA, T.; HIDEAKI, K.; KIM YUJUNG. Effects of D-PVC content on properties of wood particle/plastic composite board. **China Wood Industry**, v. 12, n. 3, p. 6-9, 1998.

YAN, K. L.; GOGOI, B. K.; LAI, C. C.; SELKE, S. E. Composites from compounding wood fibers with recycled high density polyethylene. **Polymer Engineering and Science**, v. 30, n. 11, p. 693-699,1990.

YONGQUIST, J. A; MYERS, G. E.; MUEHL, J. H.; KRZYSIK, A. M.; CLEMONS, C. M. **Composites from recycled wood and plastics**. Final rep. For U.S. Environmental Protection Agency IAG DDW. MADISON, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1993. não paginado.

ZUBEN, F. V.; NEVES, F. L. Reciclagem do alumínio e polietileno presentes nas embalagens cartonadas tetra pak. **Revista Ação Ambiental**, n. 17, p. 14-16, 2001.

APÊNDICE A

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

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|--------------|--------------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 0,241786E-01 | 0.765161E-03 | 2,27 |
| Composição partícula | 6 | 0,536318E-02 | 0.893863E-03 | 2,65 |
| Tipo x composição | 6 | 0,389896E-02 | 0.649827E-03 | 1,93 |
| Tratamentos | (13) | 0,100273E-01 | 0,771331E-03 | 2,29 |
| Resíduo | 42 | 0,141513E-01 | 0.336935E-03 | |
| Total | 55 | | | |
| Coeficiente de Variação (%): 2,60 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 2A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para umidade de equilíbrio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|--------|-------------|----------|
| Tipo partícula | 1 | 256,94 | 256,94 | 2.995,0* |
| Composição partícula | 6 | 75,03 | 12,50 | 145,8* |
| Tipo x composição | 6 | 14,75 | 2,46 | 28,7* |
| Tratamentos | (13) | 346,72 | 26,67 | 311,0* |
| Resíduo | 42 | 3,60 | 0,857636E-1 | |
| Total | 55 | | | |
| Coeficiente de Variação (%): 3,72 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 3A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para modulo de ruptura - MOR

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|-----------|-----------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 20.051,04 | 20.051,04 | 258,82* |
| Composição partícula | 6 | 18.242,93 | 3.040,49 | 39,25* |
| Tipo x composição | 6 | 10.378,71 | 1.729,79 | 22,33* |
| Tratamentos | (13) | 48.672,68 | 3.744,05 | 48,33* |
| Resíduo | 42 | 3.253,75 | | |
| Total | 55 | 51.926,44 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 6,27 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 4A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para modulo de elasticidade - MOE

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|--------------|--------------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 28.362,51 | 28.362,51 | 0,04 |
| Composição partícula | 6 | 0,623302E+09 | 0103884E+09 | 128,94* |
| Tipo x composição | 6 | 0,489458E+08 | 8.157.628,00 | 10,13* |
| Tratamentos | (13) | 0,672276E+09 | 0,517136E+08 | 64,19* |
| Resíduo | 42 | 0,338381E+08 | 805.668,5 | |
| Total | 55 | 0,706115E+09 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 5,39 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 5A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para tração perpendicular

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|------------------------------|------|----------|-----------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 3,235537 | 3,235537 | 14,32* |
| Composição partícula | 6 | 128,1573 | 21,35955 | 27,19* |
| Tipo x composição | 6 | 14,86943 | 2,478238 | 3,16* |
| Tratamentos | (13) | 146,2623 | 11,2509 | 14,32* |
| Resíduo | 42 | 32,98787 | 0,7854255 | |
| Total | 55 | 179,25 | | |
| Coeficiente de Variação (%): | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 6A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para arrancamento de parafuso

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|-----------|-----------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 469,2216 | 469,2216 | 5,43* |
| Composição partícula | 6 | 11.761,41 | 1.960,234 | 22,68* |
| Tipo x composição | 6 | 7.888,967 | 1.314,828 | 15,22* |
| Tratamentos | (13) | 20.119,60 | 1.547,661 | 17,91* |
| Resíduo | 42 | 3.629,286 | 86,41158 | |
| Total | 55 | 23.748,88 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 6,81 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 7A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para dureza janka

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-------------------------------------|------|-----------|-----------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 276,0496 | 276,0496 | 0,38 |
| Composição partícula | 6 | 111.531,0 | 18.588,51 | 25,32* |
| Tipo x composição | 6 | 38.293,59 | 6.382,266 | 8,69* |
| Tratamentos | (13) | 150.100,7 | 11.546,21 | 15,73* |
| Resíduo | 42 | 30.831,63 | 734,0864 | |
| Total | 55 | 180.932,3 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 5,7652 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 8A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para inchamento em espessura – 90% UR e 20 °C temperatura

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|------------------------------------|------|--------|--------------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 25,56 | 25,5586 | 798,62* |
| Composição partícula | 6 | 5,73 | 0,9544 | 29,82* |
| Tipo x composição | 6 | 1,7151 | 0,2859 | 8,93* |
| Tratamentos | (13) | 33,00 | 2,54 | 79,32* |
| Resíduo | 42 | 1,3441 | 0,320032E-01 | |
| Total | 55 | 34,34 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 16,34 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 9A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para inchamento em espessura – 2 horas de imersão

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|------------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|
| Tipo partícula | 1 | 863,8680 | 863,8680 | 1.859,04* |
| Composição partícula | 6 | 492,1899 | 82,03165 | 176,53* |
| Tipo x composição | 6 | 135,6568 | 22,60947 | 48,66* |
| Tratamentos | (13) | 1.491,715 | 114,7473 | 246,94* |
| Resíduo | 42 | 19,51674 | 0,4646842 | |
| Total | 55 | 1.511,231 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 11,69 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 10A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para inchamento em espessura – 24 horas de imersão

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|
| Tipo partícula | 1 | 2.048,345 | 2.048,345 | 2.851,98* |
| Composição partícula | 6 | 660,0439 | 110,0073 | 153,17* |
| Tipo x composição | 6 | 239,3827 | 39,89712 | 55,55* |
| Tratamentos | (13) | 2947,772 | 226,7517 | 315,71* |
| Resíduo | 42 | 30,16516 | 0,7182182 | |
| Total | 55 | 2.977,937 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 9,43 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade

Quadro 11A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para expansão linear – 90% UR e 20 °C temperatura

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|------------------------------------|------|--------------|--------------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 0,482190E-02 | 0,482190E-02 | 44,69* |
| Composição partícula | 6 | 0,950105E-02 | 0,158351E-02 | 14,68* |
| Tipo x composição | 6 | 0,276829E-02 | 0,461382E-03 | 4,28* |
| Tratamentos | (13) | 0,170912E-01 | 0,131471E-02 | 12,18* |
| Resíduo | 42 | 0,453178E-02 | 0,10790E-03 | |
| Total | 55 | 0,216230E-01 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 21,91 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 12A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para expansão linear – 2 horas de imersão

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|------------------------------------|------|--------------|--------------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 0,101089E-01 | 0,101089E-01 | 31,25* |
| Composição partícula | 6 | 0,830727E-01 | 0,138455E-01 | 42,80* |
| Tipo x composição | 6 | 0,221210E-01 | 0,368683E-02 | 11,40* |
| Tratamentos | (13) | 0,115303 | 0,886943E-02 | 27,42* |
| Resíduo | 42 | 0,135861E-01 | 0,323478E-03 | |
| Total | 55 | 0,128889 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 19,99 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 13A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para expansão linear – 24 horas de imersão

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|------------------------------------|------|--------------|--------------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 0,164663E-01 | 0,164663E-01 | 20,65* |
| Composição partícula | 6 | 0,684490E-01 | 0,114082E-01 | 14,30* |
| Tipo x composição | 6 | 0,198392E-01 | 0,330653E-02 | 4,15* |
| Tratamentos | (13) | 0,104755 | 0,805804E-02 | 10,10* |
| Resíduo | 42 | 0,334965E-01 | 0,797536E-03 | |
| Total | 55 | 0,138251 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 23,20 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 14A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para adsorção de umidade – 90% UR e 20 °C temperatura

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|----------|--------------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 2,574733 | 2,574733 | 82,93* |
| Composição partícula | 6 | 0,736360 | 0,122727 | 3,95* |
| Tipo x composição | 6 | 0,494974 | 0,824957E-01 | 2,66* |
| Tratamentos | (13) | 3,806067 | 0,2927744 | 9,43* |
| Resíduo | 42 | 1,303999 | 0,310476E-01 | |
| Total | 55 | 5,110067 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 9,52 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 15A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para absorção de umidade – 2 horas de imersão

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|-----------|-----------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 766,4241 | 766,4241 | 105,29* |
| Composição partícula | 6 | 15.490,85 | 2.581,808 | 354,69* |
| Tipo x composição | 6 | 2.791,103 | 465,1838 | 63,91* |
| Tratamentos | (13) | 19.048,38 | 1.465,260 | 201,30* |
| Resíduo | 42 | 305,7162 | 7,278956 | |
| Total | 55 | 19.354,09 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 9,31 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 16A - Resumo da análise de variância (ANOVA) e do teste F para absorção de umidade – 24 horas de imersão

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | Teste F |
|-----------------------------------|------|-----------|-----------|---------|
| Tipo partícula | 1 | 6.541,384 | 6.541,384 | 533,16* |
| Composição partícula | 6 | 8.813,390 | 1.468,898 | 119,72* |
| Tipo x composição | 6 | 692,1878 | 115,3646 | 9,40* |
| Tratamentos | (13) | 16.046,96 | 1.234,382 | 100,61* |
| Resíduo | 42 | 515,2983 | 12,2690 | |
| Total | 55 | 16.562,26 | | |
| Coeficiente de Variação (%): 7,37 | | | | |

* significativo a 5% de probabilidade.