

ANTÔNIO DA SILVA MACIEL

**CHAPAS DE PARTÍCULAS AGLOMERADAS DE MADEIRA DE  
*Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis*, EM MISTURA COM  
POLIESTIRENO E POLIETILENO TEREFALATO**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2001

ANTÔNIO DA SILVA MACIEL

**CHAPAS DE PARTÍCULAS AGLOMERADAS DE MADEIRA DE  
*Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis*, EM MISTURA COM  
POLIESTIRENO E POLIETILENO TEREFTALATO**

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

APROVADA: 10 de outubro de 2001.

---

Prof. Ricardo Marius Della Lucia  
(Conselheiro)

---

Prof. Alexandre Santos Pimenta  
(Conselheiro)

---

Pesq. José Tarcísio da Silva de Oliveira

---

Pesq. Ana Márcia M. L. Carvalho

---

Prof. Benedito Rocha Vital  
(Orientador)

## AGRADECIMENTO

A Deus, por minha vida.

A Mariza, Danielli e João Pedro, razão de minha existência.

A meus pais, José e Elvira, a meus irmãos e sobrinhos, pela paciência.

À Universidade Federal de Viçosa, por minha formação acadêmica.

Ao professor Dr. Benedito Rocha Vital, por sua capacidade e interesse em nosso trabalho e pela confiança em mim depositada, ao qual serei eternamente agradecido.

A Arcanjo Castilho de Queiróz e Azarias Machado de Andrade, meus amigos.

Aos professores Ricardo Marius Della Lucia e Alexandre dos Santos Pimenta e José Tarcísio da Silva de Oliveira e Ana Márcia M.L. Carvalho, pela colaboração.

À Alba Química, pela gentileza e doação dos adesivos.

Aos funcionários Aristeu, Ézio, Maninho, Osvaldo e Magalhães, pela ajuda.

Ao Governo Brasileiro, por ter financiado meus estudos.

Ao meu amigo Franz Lopes da Silva, pela contribuição na formatação da tese.



## ÍNDICE

	Página
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1. Painéis aglomerados .....	5
2.2. Produção de painéis aglomerados.....	6
2.2.1. Descascamento.....	6
2.2.2. Obtenção dos cavacos e das partículas .....	7
2.2.3. Secagem das partículas .....	9
2.2.4. Peneiramento .....	11
2.2.5. Aplicação do adesivo .....	11
2.2.6. Formação do colchão .....	15
2.2.7. Prensagem das chapas .....	16
2.2.8. Acabamento das chapas .....	17
2.3. Propriedades das chapas de partículas .....	18
2.3.1. Densidade do painel .....	19
2.4. Compósitos termoplásticos.....	21
2.4.1. Ciclo de produção dos produtos à base de plástico/madeira .	22
2.5. Matérias-primas .....	22
2.5.1. Elementos lignocelulósicos .....	24
2.5.2. Composição da madeira .....	25
2.6. Resinas termoplásticas.....	26
2.6.1. Plásticos .....	26
2.6.2. Classificação dos plásticos .....	28
2.6.2.1. Quanto à estrutura química .....	29

	Página
2.6.2.2. Quanto à forma da cadeia polimérica.....	30
2.6.2.3. Quanto à morfologia interna .....	31
2.6.2.4. Quanto ao comportamento frente à temperatura .....	32
2.6.2.5. Quanto ao comportamento mecânico .....	33
2.6.2.6. Quanto ao tipo de aplicação.....	35
2.6.3. Principais resinas termoplásticas.....	35
2.6.3.1. Poliestireno cristal.....	35
2.6.3.2. Síntese do poliestireno cristal .....	39
2.6.3.3. Polietileno teraftalato (PET) .....	42
2.7. Aditivos compatibilizadores .....	43
2.8. Mistura dos constituintes .....	50
2.9. Tecnologias de produção.....	51
2.9.1. Compósitos com alto conteúdo de plásticos.....	51
2.9.2. Compósitos com baixo conteúdo de plásticos .....	53
2.10. Avaliação dos compósitos termoplásticos .....	54
2.11. Emprego dos compósitos termoplásticos .....	55
2.12. Produção de compósitos .....	56
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	66
3.1. Material .....	66
3.2. Preparação das partículas.....	66
3.3. Preparação das chapas .....	67
3.4. Delineamento experimental .....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	72
4.1. Densidade .....	72
4.2. Tração perpendicular .....	72
4.3. Resistência à flexão estática .....	79
4.3.1. Módulo de ruptura .....	80
4.3.2. Módulo de elasticidade .....	85
4.4. Arrancamento de parafuso .....	91
4.5. Absorção de água e inchamento em espessura .....	97
4.5.1 Absorção de água .....	97
4.5.2 Inchamento em espessura .....	103
5. CONCLUSÕES .....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112

## RESUMO

MACIEL, Antônio da Silva, D.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2001. **Chapas de partículas aglomeradas de Madeira de *Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis*, em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato.** Orientador: Benedito Rocha Vital. Conselheiros: Ricardo Marius Della Lucia e Alexandre Santos Pimenta.

O País produziu em 1999 cerca de 3,5 milhões de toneladas das principais resinas termoplásticas, e, desse total, mais de 65% foram destinados às indústrias de embalagens plásticas. Estas embalagens, após absorvidas pelo mercado consumidor, são descartadas como resíduos pós-consumo e, por não serem biodegradáveis, tornam-se um sério problema ambiental. Este material rejeitado, após recuperado, poderia ser utilizado, em associação com a madeira, como matéria-prima para produção de chapas aglomeradas. Com o propósito de avaliar essa possibilidade, foi objetivo do presente estudo produzir chapas de partículas em camada única por meio da combinação desses materiais. Assim, empregando-se três níveis de poliestireno (PS) (0, 25 e 50%), dois níveis da mistura contendo poliestireno e polietileno tereftalato (PET/PS) (5/20 e 10/40%), três níveis de adesivo (0, 4 e 6%) à base de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído e três níveis de solução de poliestireno em tolueno (0, 4 e 6%), combinados com três níveis (0, 50 e 75%) de partículas de madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, foram produzidas 164 chapas com dimensões aproximadas de 400 x 400 x 10 mm e de densidade final desejada igual a 0,60 g/cm<sup>3</sup>, geradas a partir de 82 tratamentos com duas repetições visto que para cada espécie de

madeira foram produzidas seis chapas sem adesivo. As chapas produzidas tiveram as suas propriedades físicas e mecânicas determinadas em conformidade com a norma ASTM D-1037-91. Os resultados obtidos foram comparados com os mínimos exigidos pela norma ANSI/A 208.1-1993 (*Wood Particleboard*). Os valores experimentais, das propriedades mecânicas, com exceção daqueles das chapas produzidas sem adesivos, demonstram, quase que integralmente, que os produtos elaborados ultrapassam os valores mínimos requeridos, tornando-se, assim, aptos a serem comercializados. Quanto á absorção de água e inchamento em espessura, após 24 horas de imersão, todas as chapas à base de madeira/plástico excederam o valor máximo proposto pela norma. As chapas nas quais se aplicou a solução de poliestireno em tolueno foram, de modo geral, as que apresentaram os melhores valores para todas as propriedades.



## ABSTRACT

MACIEL, Antônio da Silva, D.S., Universidade Federal de Viçosa, October 2001. **Agglomerated particleboards of wood of *Pinus eliottii* or *Eucalyptus grandis*, mixed with polystyrene and polyethylene tereftalate.** Adviser: Benedito Rocha Vital. Committee Members: Ricardo Marius Della Lucia and Alexandre Santos Pimenta.

In 1999 the Country (Brazil) produced around 3.5 million of tons of the main thermoplastic resins, and, of this total, more than 65% were used by the plastic containers industries. After being used by the consuming market, these containers are discarded as post-use residues and, since they are not biodegradable, they represent a serious environmental problem. This rejected material after being recovered, could be used, associated with wood, as raw material to produce particleboards. In order to evaluate this possibility, the objective of this study was to produce particleboards with a single layer by means of the combination of these materials. Thus, using three levels of polystyrene (PS) (0, 25 and 50%), two levels of the mixture containing polystyrene and polyethylene tereftalate (PET/PS) (5/20 and 10/40%), three levels of adhesives (0,4 and 6%) based on urea-formaldehyde and phenol-formaldehyde, and three levels of polystyrene in toluene solution (0,4 and 6%), combined with three levels (0, 50 and 75% of particles of wood of *Pinus eliottii*

and *Eucalyptus grandis*, 164 boards with sizes around 400 x 400 x 10 mm and with a desired final density of 0.60 g/cm<sup>3</sup> were produced from 82 treatments with two repetitions since for each wood species six boards were produced without adhesive. The boards had their physical and mechanical properties determined according to the standard ASTM D-1037-91. The results obtained were compared with the minimum requirements of the standard ANSI/A 208.1-1993 (Wood Particleboard). The experimental values of mechanical properties, except those of boards produced without adhesive, showed, in almost all cases, that the products surpass the required minimum values, this being suitable to be commercialized. However, the values of water absorption and thickness swelling, after 24 hours of immersion, of all boards based on wood/plastic exceeded the maximum value proposed by the standard. The boards treated with the solution of polystyrene in toluene were, in a general way, those that presented the best values for all properties.

## 1. INTRODUÇÃO

A primeira citação sobre chapas de partículas de madeira foi feita por Ernst Hubbard em 1887, em seu trabalho intitulado “Die Derwertung Der Holzadfall” (utilização de resíduos de madeira), que descrevia a produção desses produtos pela mistura de serragem e albumina de sangue, prensados sob a ação de calor. Logo em seguida, em 1889, uma patente germânica, descrevia outro método de formação de painéis que empregava maravalhas planas dispostas em camadas cruzadas sobre um pano de linho.

Desde seu início, na Alemanha, até o final da década de 1930, inúmeros trabalhos de pesquisa foram conduzidas em algumas partes do mundo, principalmente nos Estados Unidos, na tentativa de se adequar as matérias-primas e os processos de produção para a obtenção de produtos de melhor qualidade. Assim, em 1936, foram produzidas as primeiras chapas de partículas em um sistema automatizado, o que permitiu o verdadeiro avanço da indústria de painéis. Em 1941 e 1942, iniciou-se, respectivamente na Alemanha e nos EUA, a produção comercial dos painéis de madeira aglomerada. Entretanto, com o avançar da Segunda Guerra Mundial, a produção de chapas de partículas foi praticamente paralizada, em virtude do maior destaque dado à produção de painéis compensados os quais seriam empregados na indústria aeronáutica da época. Após este período de estagnação, a indústria de chapas de partículas retomou-se seu crescimento. Nos anos subseqüentes, novas fábricas surgiram. Na década de 60, iniciou-se a expansão maciça desta indústria, nos EUA e no resto do mundo.

No Brasil, as chapas de partículas foram introduzidas no mercado consumidor, em 1966, pela indústria Placas do Paraná. Segundo a ASSOCIAÇÃO...-ABIPA (1999), o País conta atualmente com sete grandes empresas que no seu conjunto, produziram, em 1999, 1,5 milhões de metros cúbicos de chapas, o que corresponde a cerca de 2% da produção mundial. Entre os principais países produtores de aglomerados, destacam-se a Alemanha com 17% da produção mundial e os EUA, com 14%. A produção brasileira é, em sua quase totalidade, voltada para atender a demanda da indústria moveleira que absorve este produto na forma de aglomerado cru, e mais intensivamente na forma de aglomerado revestido.

As chapas de partículas de madeira aglomerada, são usualmente, classificadas como sendo produtos elaborados pela mistura de pequenos fragmentos de madeira ou outros materiais lignocelulósicos, exceto fibras, aglutinados com adesivos sintéticos, ou outros aglomerantes, sendo o conjunto termo-prensado por tempo suficiente para que a cura de resina se efetue.

Em princípio, todo e qualquer material lignocelulósico pode ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de chapas de partículas, entretanto, só as madeiras de folhosas e de coníferas se apresentam como fonte permanente e ininterrupta de elementos lignocelulósicos para a produção desses produtos. No Brasil, a madeira utilizada para a produção de painéis aglomerados, provêm, em sua totalidade, de florestas plantadas. As empresas Placas do Paraná, Tafisa e Berneck utilizam 100% de pinus na fabricação de painéis aglomerados; a Eucatex utiliza 100% de eucalipto, enquanto a Duratex e Satipel combinam pinus e eucalipto em proporções variadas. No mundo, 50% das indústrias de chapas de partículas empregam madeira de coníferas como matéria prima principal, e outras empregam mais de um tipo de madeira em suas linhas de produção (BNDS, 2000).

No País, os adesivos mais utilizados na produção de chapas aglomeradas são uréia-formaldeído e fenol-formaldeído. Além da madeira e do adesivo, outras matérias-primas utilizadas na fabricação de aglomeradas são os aditivos, que

envolve, desde o catalisador, para resinas uréicas, emulsão de parafina, retardantes de fogo, até biocidas preservantes.

A julgar pela tendência mundial, em que se buscam novas matérias-primas e tecnologias de produção para a geração de novos produtos, um dos materiais com grande potencialidade para ser associado à madeira, para a produção de painéis à base de plástico/madeira são as resinas termoplásticas. O País produziu em 1999 cerca de 3,5 milhões de toneladas destas resinas, e, desse total, mais de 65% foi destinado às indústrias de embalagens plásticas (ANUÁRIO BRASILEIRO DO PLÁSTICO, 2000). Essas embalagens, após absorvidas pelo mercado consumidor, são descartadas como resíduos pós-consumo e, por não serem biodegradáveis, tornam-se um sério problema ambiental. Esse material rejeitado, após recuperado, poderia ser, em parte, utilizado como matéria-prima na produção de painéis de plástico-madeira.

Compósitos (do latim *compositus*) de plástico/madeira são produtos obtidos a partir de uma matriz, contínua ou descontínua, de resina termoplástica reforçada com partículas de madeira. Os produtos assim obtidos associam as melhores qualidades de cada constituinte e se caracterizam por apresentar propriedades peculiares que os distinguem de outros materiais. Possuem entre outras características, baixa massa específica, alta resistência mecânica, elevada resistência à fadiga, estabilidade dimensional, baixa transmissão de ruídos, grande resistência à corrosão, além de requerer baixo consumo energético para a sua produção. Ao contrário dos compósitos convencionais, que empregam resinas termorrígidas de epóxi, fenólicas e poliéster como matriz reforçada com fibras de vidro, kevlar, grafite e boro, que predominam até o presente, as fibras naturais e as resinas termoplásticas vem se destacando como matérias-primas de qualidade para a produção de novos compósitos.

A tecnologia de produção dos compósitos de plástico/madeira utiliza, atualmente, como matérias-primas principais, em razão de sua maior disponibilidade e adequação aos sistemas de produção, que exigem a fusão do material, os plásticos polietileno de alta e baixa densidade e o polipropileno em mistura com farinha e fibras de madeira (ENGLISH et al., 1996). Entretanto,

durante a fusão desses polímeros o calor afeta negativamente a maioria de suas propriedades. Deste modo, na tentativa de manter inalterada suas estruturas, novos tipos de plásticos tem sido avaliados, em suas formas fragmentadas, como elementos constituintes para a elaboração de materiais à base de plástico/madeira. Dentre eles o poliestireno (PS) e o polietileno tereftalato (PET), por suas características de dureza e disponibilidade tem-se mostrado como potencialmente capazes na produção desses produtos. É interessante mencionar que esses materiais obtidos como resíduos pós-consumo (reciclagem secundária) podem ser encontrados no mercado ao preço de R\$0,15 o quilograma e que este valor se eleva para R\$0,18 após sua transformação em partículas. Ao contrário, a recuperação desses produtos pelo método da extrusão eleva os preços destas resina para valores próximos daqueles das resinas virgens que giram em torno de R\$3,00 o quilo.

O objetivo geral deste trabalho foi verificar a possibilidade de fabricação de painéis de madeira/plástico a partir de misturas de partículas de *Pinus elliottii* Engelm., *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden, Poliestireno (PS) e Polietileno Tereftalato (PET), empregando adesivos de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído e solução de poliestireno em tolueno como agentes aglutinadores.

Para isto os seguintes objetivos específicos foram avaliados:

- A influência da intensidade mistura da madeira, em diferentes proporções, por plástico, na qualidade dos painéis.
- A influência da fabricação dos painéis com diferentes níveis de adesivo de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído.
- A influência da solução de poliestireno em tolueno, em diferentes níveis, na qualidade dos painéis.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Painéis aglomerados

A norma ASTM D – 1554 “Standard Definitions of Terms Relating to Wood – Base Fiber and Particle Panel Material (1986) define os termos usuais para os painéis de madeira e suas principais utilizações industriais. Os painéis de fibras e de partículas, são os termos genéricos aplicados, respectivamente, a materiais manufaturados a partir de fibras ou partículas de madeira, onde agentes ligantes ou outros materiais podem ser adicionados durante a fabricação para se obter ou melhorar certas propriedades.

Para as chapas de partículas, seus elementos lignocelulósicos constituintes, podem ser classificados, segundo MOSLEMI (1974) e FAO (1959), como: **Flocos** (flakes) – são partículas planas retangulares, finas, com espessura variando entre 0,2 e 0,4 mm, comprimento entre 25 e 100 mm e largura compreendida entre 10 e 25 mm, que dão origem a um tipo de painel denominado Flakeboard; **Aparas** (shavings) – partículas finas, sem medidas padronizadas, resultantes das diversas operações de acabamento da madeira; **Cavacos** (chips) são fragmentos de madeira de tamanho variando entre 12 e 25 mm de comprimento por 1 a 5 mm de largura e espessura um pouco menor; **Lã de madeira** (excelcior ou wood-wool) – definida como partículas longas e finas, com aproximadamente 250 mm

de comprimento, 5 mm de largura e 0,5 mm de espessura; **Strands** - são lâminas relativamente compridas, quando se compara a largura com a espessura, possuem comprimento variando de 12,7 a 76,2 mm, largura 6,4 a 25, 4 mm e espessura de 0,25 a 0,64 mm, com as quais se produz um tipo de painel com partículas orientadas denominado OSB (oriented strand board); **Partículas** (particles) – são pequenos fragmentos de madeira com comprimento variando entre 1, 3 e 12,7 mm e largura e espessura variando de 0,13 a 1,3 mm. Dispostas aleatoriamente geram as chapas de partículas aglomeradas convencionais; **Serragem** (granule) – são partículas cujo comprimento, largura e espessura são aproximadamente iguais. Exemplo típico deste material é a serragem de madeira em suas várias granulometrias.

## **2.2. Produção de painéis aglomerados**

### **2.2.1. Descascamento**

A produção de chapas de partículas, em nível comercial, inicia-se com a chegada da madeira ao pátio de indústria (Figura 1) com teores de umidade que variam de 35 a 120%, a qual deve ser reduzida para próximo de 30% para facilitar o descascamento e as operações subsequentes de transformação. A remoção da casca é feita em descascadores do tipo abrasivo, hidráulico ou mecânico. O tambor de descascamento é um dos equipamentos do tipo abrasivo mais utilizado. Consta de um grande tambor aberto nas extremidades, onde se coloca as toras soltas que ao girarem e, por atrito entre elas, vão despreendendo suas cascas, sendo estas liberadas do sistema por aberturas em uma das seções do tambor. Neste sistema, utilizam-se aspersores de água para limpar a madeira e arrastar a casca. No descascamento do tipo hidráulico, utilizam-se jatos de água a pressões que oscilam entre 30 e 105 kg/cm<sup>2</sup> para desprender a casca da madeira; tratando-se de descascadores mecânicos, utilizam-se facas ou correntes ou dispositivos rotatórios de construção especial para descascar a madeira.



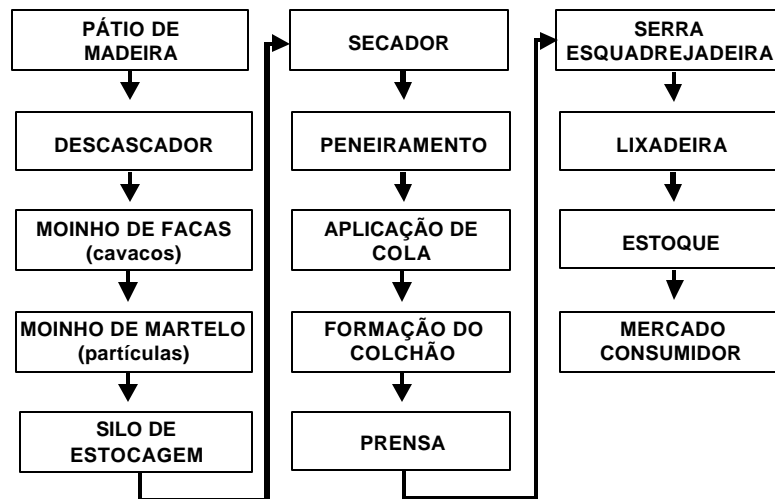


Figura 1 - Fluxograma de produção de chapas de partículas em escala comercial.

A casca forma de 6 a 17% do volume da madeira, e sua remoção é um fator importante, tendo em vista os efeitos negativos na qualidade final do produto elaborado. Teores de casca superiores a 10%, no painel, ocasionam redução em sua resistência mecânica e estabilidade dimensional.

### 2.2.2. Obtenção dos cavacos e das partículas

A madeira após descascada é transformada em partículas, para isso os toretes passam inicialmente, por uma redução primária em um moinho de facas ou picador, onde por cortes perpendiculares a grã da madeira são transformadas em cavacos. Os cavacos sofrem uma redução secundária, em moinho de martelos, sendo, então, transformados em partículas de forma e tamanho desejado. A geometria das partículas obtidas e a razão de esbeltez, que é a relação entre o comprimento e a espessura das partículas, são fatores importantes que influenciam todas as propriedades das chapas, desde suas propriedades mecânicas e características superficiais, até seu acabamento final. MOSLEMI (1974), cita a produção de chapas, utilizando partículas longas e finas, empregando uma mesma quantidade de adesivo, afirmando que estas características levam a um

menor valor de ligação interna, quando comparadas às chapas feitas, com partículas curtas e espessas. Entretanto, partículas longas e finas produzem chapas de maior resistência à flexão e maior estabilidade dimensional. Segundo o mesmo autor, para chapas de partículas de três camadas, as partículas superficiais devem apresentar uma razão de esbeltez entre 120 e 200. As partículas nesta razão, são finas e longas, possuindo alto grau de flexibilidade, o que permite um melhor contato entre as partículas quando estas são comprimidas. Para as partículas que compõem o miolo, a razão ideal de esbeltez deve estar em torno de 60. De acordo com GEIMER et al. (1975), as propriedades de flexão das chapas aglomeradas aumentam diretamente com o comprimento das partículas e são inversamente proporcionais à sua espessura. Para BRUMBAUGH (1960), a razão entre o comprimento e a espessura das partículas deve ser, no mínimo, 200, estando tal razão diretamente relacionada com o módulo de elasticidade (MOE). Segundo o autor, chapas produzidas com partículas curtas e espessas apresentam uma maior ligação interna quando comparadas aquelas das chapas produzidas com partículas longas e finas; por outro lado partículas longas e finas tem um efeito positivo no inchamento em espessura, absorção de água e expansão linear, reduzindo estas propriedades.

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. Normalmente esta característica é estabelecida em função das propriedades desejadas e da matéria-prima disponível. Painéis elaborados com partículas curtas e espessas, pela menor área de contato entre suas superfícies, e por sua menor flexibilidade favorecem a resistência à tração perpendicular porém tem efeito negativo no módulo de ruptura (MOR) e MOE em flexão estática (LEHMANN, 1974). O tamanho das partículas influencia no consumo de adesivo para um mesmo nível de propriedades. Quanto maior o coeficiente de esbeltez da partícula mais elevado será o consumo de adesivo. VITAL et al. (1974) afirmaram que a utilização de partículas finas e longas de menor densidade resultaram em chapas de melhor estabilidade dimensional. HALLIGAN (1970) afirma que a utilização de partículas de maior largura proporciona produtos de menor estabilidade dimensional.

### 2.2.3. Secagem das partículas

As partículas de madeira após produzidas são levadas, por meio de um sistema de esteiras rolantes ou de tubos condutores pneumáticos, até os silos de estocagem. Daí, por um sistema de alimentação pneumático são conduzidas para o secador onde seu teor de umidade é automaticamente ajustado para teores prefixados, geralmente entre 3 e 6%, ideais para a aplicação do adesivo. Existem diversos modelos de secadores disponíveis para os fabricantes de chapas, o tradicional é o secador de tambor de três passagens. A fonte geradora de calor pode ser o gás proveniente da queima de óleo ou pó de serragem.

O teor de umidade das partículas tem um efeito significativo no processo de produção das chapas e nas suas propriedades. Partículas muito úmidas provocam a formação de bolhas no interior das chapas que, no momento da prensagem, levam a um conseqüente estouro da mesma quando a pressão da prensa é aliviada; requerem tempo mais longo de prensagem e interferem na qualidade da adesão. Por outro lado, partículas muito secas aumentam o perigo de incêndio no interior dos cilindros de secagem, geram maior quantidade de pó e são expelidas das laterais da chapa durante a operação de prensagem, devido à deficiência de adesivo em suas superfícies.

Segundo MOLESMI (1974), o teor de umidade das partículas provêm das seguintes fontes: 1) água remanescente da secagem 3 a 6%; 2) água adicionada pelos adesivos que contêm de 30 a 60%; 3) água aplicada por aspersão na superfície da chapa, no momento da prensagem, com o propósito de melhorar a transferência de calor para o miolo da chapa e tornar sua superfície mais lisa devido a uma maior plasticização das partículas, geralmente 1%. Um teor de umidade normalmente superior a 6%, ocasiona nas partículas maior flexibilidade, tornando-as mais facilmente compressíveis; demanda um maior tempo de prensagem devido ao efeito retardante da umidade nas reações químicas de polimerização do adesivo; e provoca o fenômeno da delaminação das chapas. A delaminação da chapa deve-se a um desenvolvimento irregular do gradiente de densidade ao longo da espessura da chapa, e pode estar associado a uma excessiva umidade das partículas. A água contida nas partículas superficiais ao entrar

em contato com os pratos quentes da prensa evapora e migra, na forma de vapor para o miolo da chapa transferindo calor pelos fenômenos da convecção e condução. Em condições normais de umidade, este vapor migra do centro para as extremidades das chapas onde é evaporado. Um excesso de umidade nas partículas causa uma maior retenção de água no miolo da chapa levando a linhas de adesão mais fracas que se rompem ao menor esforço solicitado. MALONEY (1977), afirma que o teor de umidade e sua distribuição ao longo da espessura da chapa tem influência marcante sobre suas propriedades. Assim, um maior teor de umidade superficial em relação ao miolo da chapa resulta num maior gradiente de densidade da chapa, em consequência algumas propriedades apresentam um comportamento diverso: a flexão aumenta significativamente, enquanto a resistência da ligação interna é reduzida. Por outro lado, um reduzido teor de umidade nas partículas provoca uma redução na transferência de calor das camadas externas para o miolo da chapa, uma densidade irregular das chapas produzidas, e superfícies mais ásperas; baixa umectação da superfície das partículas; uma absorção excessiva de adesivo pela superfície da partícula; redução da área de contato devido à maior rigidez das partículas.

Uma diferenciação no teor de umidade traz as seguintes vantagens: rápida consolidação das camadas superficiais; transferência de calor mais rápida e menor ciclo de prensagem; previne a pré-cura do adesivo na superfície das partículas; produz superfícies mais lisas.

O gradiente de umidade do colchão influi na transferência de calor ao longo de sua espessura e o tempo necessário para o aquecimento do miolo diminui com o aumento do teor de umidade da superfície do colchão. A umidade excessiva interfere negativamente na cura do adesivo e reduz a resistência do painel à compressão, e , promove maior densificação das camadas superficiais. KUHNE e BELIMOU (1978) verificaram que o teor de umidade da massa de partículas deveria variar de 17 a 28% para as camadas externas e de 7 a 14% para o miolo, quando se faz a prensagem a quente.

O tempo de secagem das partículas depende da temperatura e da velocidade de escoamento no interior dos secadores.

#### 2.2.4. Peneiramento

As partículas após passarem pelo secador são separadas por seus pesos ou dimensões, em um sistema de classificadores pneumáticos, dispostos em série, e em peneiras mecânicas, sendo, então, dirigidas para os silos de estocagem a partir dos quais receberão os adesivos.

#### 2.2.5. Aplicação do adesivo

A quantidade e tipo de adesivo são fatores de suma importância para a qualidade final das chapas de partículas produzidas. Os adesivos são aplicados, em quantidades relativamente pequenas, de 6 a 9% em uma grande massa de partículas com uma grande área superficial. A adição destas substâncias contribui com cerca de 35 a 60% do custo final da produção dos painéis aglomerados e a resistência das chapas depende da uniformidade de sua distribuição que pode ser efetuada pelos métodos principais da atomização (spray), quando o adesivo é aplicado em forma de pequenas gotículas, pela ação de pressão hidráulica ou ar comprimido; e cilindros, que tem suas superfícies constantemente recobertas por uma fina camada de adesivo, entre os quais passam as partículas. A operação pode ser realizada em batelada ou de forma contínua.

Inúmeros trabalhos científicos tem demonstrado que o tipo, a quantidade, a distribuição e o tamanho da gotícula pulverizada de adesivo influenciam significativamente a maioria das propriedades físicas e mecânicas das chapas de partículas, particularmente no MOR e MOE, na resistência perpendicular à superfície (ligação interna), e o inchamento em espessura (BEECH, 1975; BOHNER e GERTJEJANSEN, 1975; KASPER e CHOW, 1980).

Segundo POST (1958), o MOR é sensível a quantidade de adesivo e aumenta, quando se eleva o conteúdo de adesivo de dois para seis por cento. LEHMANN (1974) observou que o aumento no teor de resina de quatro para oito por cento acarretou uma leve melhora no MOR e MOE e no inchamento em espessura das chapas, mas um aumento substancial na ligação interna. BRITO (1984), produzindo chapas de *wafboard* com quatro espécies do gênero *Pinus*

verificou uma melhoria nas propriedades mecânicas e no inchamento em espessura quando elevou a quantidade de adesivo aplicado de 4% para 8%. KEINERT e MATOS (1987) produzindo chapas de partículas com madeiras do gênero *Pinus* empregando quatro níveis de adesivo, correspondentes a 2, 4, 6 e 8% verificaram que os produtos elaborados com oito por cento de adesivo apresentaram propriedades superiores a todas as outros.

Segundo MALONEY et al. (1976), a tração perpendicular à superfície (ligação interna) é a propriedade mais sensível à qualidade de colagem e por isso a mais importante para se estudar o efeito de um determinado adesivo sobre a qualidade do produto.

Para as chapas de partículas de uma única camada, a aplicação do adesivo sobre as partículas é realizada pelo mesmo aplicador, para as chapas multicamadas, a aplicação do adesivo é feita separadamente, em dois aplicadores, um para as partículas que formarão o miolo e outro aplicador para as partículas que comporão as superfícies superior e inferior. Nas partículas que irão compor as superfícies do painel, aplica-se maior quantidade de adesivo em função da maior área superficial específica; por outro lado, as partículas do miolo receberão menor quantidade de adesivo, em função da menor área superficial específica.

Os principais adesivos, comercialmente empregados na indústria de madeira aglomerada, são aqueles de origem sintética e que apresentam a propriedade de se tornarem termorrígidos pela ação do calor ou de catalisadores específicos. Assim, são amplamente empregados com este propósito os adesivos de fenol-formaldeído, uréia-formaldeído e isocianatos sem extensores ou cargas (YOUNGQUIST, 1999).

Adesivos fenólicos são produzidos por reação do fenol com formaldeído (37%), numa razão molar que varia de 1:1.1 a 1:2.0, sendo a reação de condensação normalmente catalisada pelo hidróxido de sódio em solução de 50%, em temperaturas variando de 80 a 100 °C. O tempo de reação para este adesivo varia de uma a oito horas, dependendo das condições de pH, da relação fenol/formaldeído e da temperatura de reação (PIZZI, 1983).

Adesivos fenólicos têm a capacidade de promover resistentes e duráveis ligações em compósitos de madeira, principalmente naqueles produtos expostos a condições de alta umidade, entretanto, apresentam o inconveniente de apresentar uma linha de cola escura o que impede sua utilização para determinados fins (STEPHENS e KUTSCHA, 1987; ELLIS, 1993; ANDERSEN e TROUGHTON, 1996).

Adesivos de uréia-formaldeído são obtidos pelas reações de condensação entre uréia e formaldeído, empregando-se, freqüentemente, uma relação molar igual ou menor que 1:1,3 (PIZZI, 1983). Os catalisadores empregados para sua cura são, normalmente, sais de amônia como cloreto de amônia e sulfato de amônia, sendo usados em soluções aquosas em concentrações que variam de 15 a 20%. Estas soluções, muitas vezes, fornecem, também, a quantidade de água necessária para a obtenção de umidade final desejada para as camadas de partículas, tanto externas quanto internas.

A quantidade de catalisador empregada, varia de acordo com a indústria em função das características técnicas do equipamento, e do ciclo de prensagem. Para o sulfato de amônio, são empregadas quantidades variando de 0,8 a 1% de sólidos de sulfato de amônia, para a camada externa do painel e 1,2 a 1,5% de sólidos de sulfato de amônia para a camada interna, em relação à quantidade de sólidos de resina aplicada.

Os sais empregados como catalisadores tem como função o abaixamento do pH da resina uréica, de aproximadamente 7,0 para 4,0, provocando desta forma a sua cura (polimerização). Estes sais reagem com o formol, gerando os ácidos correspondentes. São estes ácidos que geram o abaixamento do pH.

O formol que reage com o sal de amônio pode estar na forma livre na resina ou ser liberado de sua cadeia.

As resinas de uréia-formaldeído são mais baratas que as resinas de fenol-formaldo, sendo também mais intensivamente utilizadas na elaboração de compósitos de madeira para uso interior, tendo a vantagem de apresentar uma linha de cola incolor (LEHMANN, 1973; STEWART e VITAL et al., 1974; VITAL et al., 1980; HASELEIN et al., 1989; VITAL et al., 1992).

Atualmente, cerca de 90% das fábricas utilizam resinas de uréia-formaldeído (UF) na manufatura de painéis.

Os adesivos de isocianatos para madeira foram desenvolvidos nos últimos 25 anos. O principal isocianato empregado para sua elaboração é o 4-4'difenilmetano diisocianato (MDI). Por polimerizarem em altas temperaturas, estes adesivos não necessitam, normalmente, de catalisadores para completar sua cura (PIZZI, 1983).

Os adesivos de MDI, quando aplicados sobre a madeira, tem seu desempenho melhorado devido à reação de grupos uretanos terminais (- NCO) presentes em suas estruturas com os grupos hidroxil presentes nas unidades poliméricas da madeira.

À temperatura ambiente (25 °C), o adesivo de MDI é uma solução emulsificada em água, viscosa, de cor avermelhada. Sua constituição química consiste de aproximadamente 40% de 4-4'difenilmetano diisocianato, com os outros 60% compreendendo as formas isoméricas de dímeros e oligômeros de maior peso molecular. O tempo de armazenamento deste adesivo varia de 6 a 12 meses.

Uma desvantagem dos adesivos à base de MDI está relacionada à prensagem, a quente, do produto elaborado, pois, pela facilidade que estes adesivos possuem em reagir com a água, os produtos elaborados com partículas de madeira com maior teor de umidade podem causar aderência deste material aos pratos da prensa. Esta característica é atribuída à reação dos adesivos com a película de água ligada à superfície do painel, com a camada de oxidrato na superfície metálica. Atualmente este problema tem sido resolvido pelo uso de agentes externos de separação, como sabões à base de água, e pelo emprego de emulsões de parafina à base de água (PIZZI, 1994).

Por reagirem com a umidade presente na madeira os adesivos de MDI são tolerantes a maiores conteúdos de umidade da madeira do que outras resinas. Teores de umidade da madeira da ordem de 7 a 10% são usadas normalmente para o MDI. A dosagem requerida para se obter a mesma qualidade de adesão de outros adesivos é significativamente menor: 2 a 6% de adesivo de MDI é suficiente, existindo ensaios de qualidade que atestam bons resultados com 1,5% de adesivo, em chapas de MDI.



Na aplicação de adesivos de MDI em compostos de madeira, a cura e conseqüentemente a reticulação do adesivo é feita pela aplicação de calor, empregando temperatura variando entre 140 e 200 °C.

Extensivos trabalhos têm mostrado a qualidade das propriedades de produtos reconstituídos de madeira colados com estes adesivos (JOHNS, 1981; HAWKE et al., 1992; SUN et al., 1994; MARCINKO, 1998).

No Brasil ainda não se usa este adesivo na produção de chapas de partículas.

### **2.2.6. Formação do colchão**

É o processo de deposição das partículas com adesivo, por meio de uma máquina formadora, sobre pratos que são separados das chapas após a prensagem ou diretamente sobre telas ou malhas de aço num processo de formação contínuo. A manta de partículas, pode ainda, ser formada por um processo intermediário aos dois primeiros, isto é, as partículas podem ser depositadas sobre pratos que entretanto não entram na prensa quente. O processo sem pratos, bem como o processo intermediário, apresentam algumas vantagens quando comparados ao processo de pratos tais como: o sistema de retorno dos pratos é eliminado ou reduzido; a espessura e a densidade das chapas formadas são mais uniformes; as aparas laterais são menores havendo menor desperdício de material quando as chapas são lixadas; não exigem consumo de energia para aquecer os pratos durante a prensagem e para resfriá-los posteriormente. Estes processos, no entanto, possuem algumas desvantagens: a pré-prensagem da manta é imprescindível; exigem o emprego de adesivos com aderência (tack) adequada; o adesivo deve ser mais resistente à pré-cura. Para chapas de três camadas a formação da manta sobre o suporte empregado, costuma ocorrer em quatro etapas. Uma para a camada inferior, duas para as camadas internas e uma para a camada superior.

### 2.2.7. Prensagem das chapas

A prensagem, a quente, da manta formada tem por finalidade a sua consolidação, densificação até a espessura desejada e a cura do adesivo. As prensas utilizadas nas linhas de produção, podem apresentar uma única abertura (prensas contínuas) ou múltiplas aberturas articuladas. Devido à magnitude das forças envolvidas, às dificuldades em transferir rapidamente quantidades significativas de calor para a manta e às freqüentes modificações no ciclo de prensagem, as prensas contínuas, não foram de início bem aceitas, sendo mais comum a prensagem em bateladas.

O ciclo de prensagem é composto de quatro variáveis que podem ser controladas e cuja manipulação dão as características finais desejadas ao produto formado. O tempo de fechamento da prensa influencia na formação do gradiente vertical de densidade e corresponde ao tempo envolvido desde o contato inicial dos pratos da prensa com a superfície do colchão até se atingir a espessura final da chapa. O tempo de prensagem é o intervalo de tempo decorrido entre o momento em que o colchão é comprimido, até a espessura final da chapa, e o momento de abertura dos pratos da prensa. Seu controle otimiza o processo de produção. O tempo de prensagem para um determinado tipo e espessura da chapa, é geralmente constante, por isso a capacidade da linha de produção é função da dimensão e do número de aberturas da prensa. O tempo de prensagem deve ser o suficiente para possibilitar a migração do excesso de água para as bordas da chapa até o término da prensagem e permitir a cura da resina. Segundo KELLY (1977), as chapas produzidas com resina curada inadequadamente no miolo poderão apresentar delaminação após o relaxamento da pressão, uma vez que a pressão de vapor é maior que a resistência da ligação interna da chapa. O tempo de prensagem varia entre 4 e 8 minutos e para temperaturas de prensagem entre 180 e 190 °C, é normalmente, calculado em sete ou oito segundos para cada milímetro da espessura final desejada, de acordo com informações da Alba Química.

A temperatura de prensagem, é outra variável controlada e sua função é permitir a cura do adesivo e proporcionar certa plasticização às partículas o que permite uma melhor acomodação das mesmas. Para as resinas à base de uréia-formaldeído, a temperatura recomendada varia de 140 a 160 °C, enquanto para as

resinas fenólicas são sugeridas temperatura na faixa de 160 a 180°C. HEEBINK et al. (1972) afirmam que uma maior temperatura de prensagem permite um fluxo mais rápido de calor e permite uma melhor densificação das camadas internas da chapa, resultando em maior resistência das ligações internas e menor resistência à flexão estática. Para STRICKLER (1959), a taxa inicial de penetração do calor para o centro do colchão apresenta uma relação direta com o teor de umidade total e superficial do colchão e pressão aplicada.

A pressão aplicada tem a função principal de assegurar o contato íntimo entre as partículas, através da compressão e consolidação do colchão até a espessura final da chapa. Segundo a FAO (1959) a pressão aplicada está relacionada com algumas variáveis: 1) quanto maior a área de contato entre as partículas, maior deverá ser a pressão aplicada; 2) quanto maior a densidade da chapa pretendida, maior deverá ser a pressão aplicada; 3) a pressão exercida depende da espessura, da transferência de adesivo entre as superfícies das partículas e do tempo de fechamento da prensa. Para a fabricação de painéis de média densidade a pressão requerida varia de 14 a 35 kg/cm<sup>2</sup>.

### **2.2.8. Acabamento das chapas**

Após prensadas, as chapas são retiradas da prensa por meio de elevadores de descarga, sendo colocadas sobre um sistema de esteiras rolantes em movimento, ao longo dos quais se encontram estrategicamente dispostas serras para acerto lateral (esquadrejadeira) e balança para o controle de peso. Da esteira as chapas são levadas para uma câmara de resfriamento lento para sua estabilização. O resfriamento das chapas é feito através de um sistema de garfos giratórios. A operação seguinte é o recorte para a dimensão comercial e o lixamento mecânico que permite a uniformização de suas superfícies pela passagem sucessiva de lixas de grão fino, variando entre 40 e 100. Terminado este estágio as chapas são estocadas estando prontas para serem distribuídas para o mercado consumidor.

## 2.3. Propriedades das chapas de partículas

Embora as madeiras apresentem propriedades físico-mecânicas distintas e peculiares, as chapas produzidas com este material, independentemente, do tipo e da geometria das partículas e da relação madeira/adesivo, só poderão ser escolhidas para um determinado uso, com economia e segurança, conhecendo-se os valores médios que definem seu comportamento físico e sua resistência às solicitações mecânicas.

Este conhecimento indispensável é adquirido como resultado da realização de numerosos ensaios efetuados sobre amostras representativas do produto em estudo. Para as chapas de partículas, são usualmente utilizados os ensaios especificados na norma americana ASTM D-1037-91, sendo os resultados obtidos comparados aos mínimos exigidos pela norma comercial ANSI/A – 208.1-1993. A seguir, no Quadro 1, são apresentadas as principais propriedades avaliadas nas chapas de partículas, as densidades correspondentes e, os valores mínimos requeridos para seu uso.

Quadro 1 - Propriedades requeridas para chapas de partículas

Classificação	Tolerância no comprimento e na Largura (mm)	Inchamento em Espessura Tolerância média do painel (mm)	Expansão Linear (%)	Flexão Estática		Ligação Interna (kgf/cm <sup>2</sup> )	Arrancamento de Parafusos (kgf)		Dureza (kgf)	Emissão de Formaldeído (ppm)
				MOE (kgf/cm <sup>2</sup> )	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )		Face	Borda		
H - 1	± 2,0	± 0,10	NE	24.000	165	9	180	132,5	222,5	0,30
H - 2	± 2,0	± 0,10	NE	24.000	205	9	190	155,0	445,0	0,30
H - 3	± 2,0	± 0,10	NE	27.500	235	10	200	155,0	667,5	0,30
M - 1	± 2,0	± 0,15	0,35	17.250	110	4	NE	NE	222,5	0,30
M - 5	± 2,0	± 0,15	0,35	19.000	125	4	90	80	222,5	0,30
M - 2	± 2,0	± 0,10	0,35	22.500	145	4,5	100	90	222,5	0,30
M - 3	± 2,0	± 0,10	0,35	27.500	165	5,5	110	100	222,5	0,30
LD - 1	± 2,0	± 0,15	0,35	5.500	30	1,0	40	NE	NE	0,30
LD - 2	± 2,0	± 0,15	0,35	10.250	50	1,5	55	NE	NE	0,30

H – Alta densidade (geralmente superior a 800 kg/m<sup>3</sup>)

M – Média densidade (geralmente entre 640 – 800 kg/m<sup>3</sup>)

LD – Baixa densidade (geralmente menor que 640 kg/m<sup>3</sup>)

NE – Não especificado

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

### 2.3.1. Densidade do painel

A densidade do painel está intimamente associada à densidade das madeiras empregadas na sua fabricação e à taxa de compressão necessária para a sua compactação sendo a variável que mais afeta as propriedades de resistência dos produtos formados. Segundo VITAL et al. (1974), um aumento na densidade do painel resulta num aumento na resistência em flexão.

O efeito das espécies de madeira sobre as propriedades das chapas está relacionada com suas densidades e com a adequada razão de compressão necessária para promover um eficiente contato entre as superfícies das partículas. Uma taxa de compressão na ordem de 1,2 é um bom indicativo para prever se uma determinada espécie de madeira é ou não adequada para a produção de chapas de partículas. Segundo KELLY (1977), a densidade da madeira é o parâmetro mais importante para determinar a potencialidade de uma dada espécie para a fabricação de chapas de partículas. Em geral, as espécies de madeira empregadas nas indústrias de chapas aglomeradas apresentam uma densidade variando de 0,40 a 0,60 g/cm<sup>3</sup>. Para espécies com densidade fora deste intervalo é recomendado sua mistura, em proporções adequadas, com outras madeiras de modo a se obter a densidade final desejada. NAKAMURA e SOBRAL FILHO (1982) produziram chapas de partículas, a partir de misturas de madeiras de 35 espécies tropicais da Amazônia, com densidades variando de 0,38 a 0,70 g/cm<sup>3</sup>, concluindo que painéis produzidos com densidade de 0,75 g/cm<sup>3</sup> superaram significativamente os valores mínimos exigidos pela norma comercial para os ensaios em flexão. IWAKIRI (1979), produziu chapas pela mistura de madeiras de pinus, com densidade igual a 0,42 g/cm<sup>3</sup> e eucalipto de densidade igual a 0,69 g/cm<sup>3</sup>, concluindo que a combinação destas espécies exige uma alteração na taxa de compressão para se obter produtos com densidades semelhantes.

STEWART e LEHMANN (1959), produziram chapas de partículas com quatro espécies de folhosas. Segundo os autores o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) aumentaram linearmente com a densidade do painel e apresentaram menores valores quando avaliados em chapas produzidas com madeiras mais densas, quando comparados aos valores encontrados nos painéis produzidos com madeiras de menor densidade. KEINERT Jr. (1988), produziu

chapas de partículas utilizando espécies de eucaliptos, com densidades de 0,50 e 0,59 g/cm<sup>3</sup>, concluindo que os valores do MOE e MOR se apresentam mais elevados nos painéis produzidos com madeira de menor densidade e nas chapas com maior densidade. HSE (1975) produziu chapas de flocos com nove espécies de folhosas verificando que o MOR aumenta com o aumento da densidade final da chapa. Constatou ainda que as chapas produzidas com madeiras menos densas apresentaram uma estabilidade dimensional ligeiramente melhor do que os produtos elaborados com madeiras de maior densidade.

Segundo MOSLEMI (1974), as alterações na estabilidade dimensional tem um comportamento semelhante ao inchamento em espessura, embora sejam de menor grandeza. LEHMANN (1974) conclui que o teor de resina e a densidade da chapa não tem nenhum efeito sobre a expansão linear em umidades relativas, variando de 30 a 90%; entretanto em testes de imersão em condições de vácuo e pressão, quanto maior o nível de resina maior é a estabilidade.

Segundo MALONEY et al. (1976) a resistência à tração perpendicular aumenta consideravelmente com o aumento da densidade final da chapa. Por outro lado VITAL et al. (1980) não encontraram uma correlação definida entre a resistência à tração perpendicular e a densidade da chapa. Segundo os autores, para chapas de mesma densidade a resistência ao rompimento em tração perpendicular diminui com a elevação da taxa de compressão em função dos danos causados nas partículas.

Segundo IWAKIRI (1979), o módulo de ruptura está correlacionado principalmente com a densidade da chapa; nível de adesivo empregado; taxa de compressão e orientação e geometria das partículas. MOLESMI (1974) afirma que a resistência ao arrancamento de parafusos aumenta em chapas de maior densidade e com nível mais elevado de adesivo. BRITO (1984), entretanto, não encontrou qualquer correlação entre a resistência ao arrancamento de parafusos, com o nível de adesivo e a densidade da chapa.

Segundo LEHMANN (1974), painéis de maior densidade são ligeiramente mais estáveis ao inchamento em espessura do que os de baixa densidade a um determinado teor de umidade. HALLIGAN (1970) testando chapas, com densidades iguais a 0,4 e 0,8 g/cm<sup>3</sup>, ao inchamento em espessura, concluiu que, maiores inchamentos ocorrem nas chapas de maior densidade. Segundo

HSE(1975) e GEIMER (1975) o inchamento em espessura é maior em chapas de maior densidade. VITAL et al. (1980), afirmam que o efeito da densidade da chapa no inchamento em espessura deve-se mais à umidade relativa de exposição. Em condições de baixa umidade relativa, o inchamento independe da densidade enquanto, exposição em altas umidades relativas o inchamento em espessura aumenta com o aumento da densidade. VITAL et al. (1974), avaliando o comportamento de chapas, com diferentes densidades, quando em imersão em água por 24 horas, concluíram que a absorção de água apresenta forte correlação com a densidade da chapa. Segundo os autores chapas produzidas pela aplicação de uma maior taxa de compressão apresentam menor absorção do que aquelas produzidas a uma menor taxa de compressão. Embora não conclusivas, alguns autores afirmam que a absorção de água decresce com o aumento da densidade do painel e que, a mesma não afeta significativamente a expansão linear (BOEHNER e GERTJENJANSEN, (1975).

#### **2.4. Compósitos termoplásticos**

Produtos à base de polímeros termoplásticos reciclados ou retornáveis como poliestireno (PS), polietileno (PE), polipropileno (PP), e polietilenotereftalato (PET) e fibras lignocelulósicas (fibras e farinha de madeira (*wood flour*)) estão atualmente sendo investigadas devido ao potencial que apresentam. Produtos obtidos pela mistura desses constituintes começaram a ser comercialmente empregados na década de 80, principalmente no Japão e nos Estados Unidos, sendo fabricados segundo os mais diversos perfis e utilizados para as mais variadas aplicações (WIGOTSKY, 1988). Julgando pelas tendências mundiais, o futuro dos compósitos de plástico/madeira parece ser das mais promissoras, porque, para a maioria das aplicações, esses materiais tem propriedades adequadas e são de baixo custo.

Compósitos são materiais heterogêneos onde o componente estrutural, descontínuo, fornece a principal resistência ao esforço, e o componente matricial, contínuo é o meio de transferência desse esforço (MANO, 1991).

### **2.4.1. Ciclo de produção dos produtos à base de plástico/madeira**

A produção dos compósitos termoplásticos envolve uma série de etapas, que começa com a escolha das matérias-primas e prossegue com a mistura, em dosagens adequadas, dos materiais, a escolha das técnicas de produção, até a avaliação da qualidade final dos produtos elaborados. A seguir, na Figura 2, apresenta-se o fluxograma de um possível ciclo produtivo desses produtos em escala experimental.

A produção de produtos à base de plástico e madeira de matriz contínua ou descontínua, inicia-se com a transformação, por processos químicos ou mecânicos das matérias-primas empregadas, para partículas nas formas desejadas. Para os produtos elaborados com fibras e farinha de madeira, adiciona-se, numa primeira etapa, os agentes compatibilizadores, sendo a mistura parcialmente fundida em um rotor termocinético de alta velocidade (3500 rpm). A massa assim obtida é resfriada e extrudada gerando as partículas que serão misturadas a seco com as partículas de plástico. A seguir a mistura toma três vias distintas: é de novo parcialmente fundida em rotor termocinético, resfriada, extrudada e transformada em partículas que serão moldadas a quente pelo método da injeção ou extrusão; é diretamente moldada; é termo-prensada com ou sem adesivo. O produto final obtido passa por um período de aclimatização, no fim do qual se efetuam os testes de qualidade, sendo, então, enviados para o consumidor.

### **2.5. Matérias-primas**

Além da madeira, fonte principal de matéria-prima para a 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. Assim, é feita a seguir uma descrição sucinta dos principais constituintes da madeira e dos polímeros termoplásticos empregado no presente trabalho.



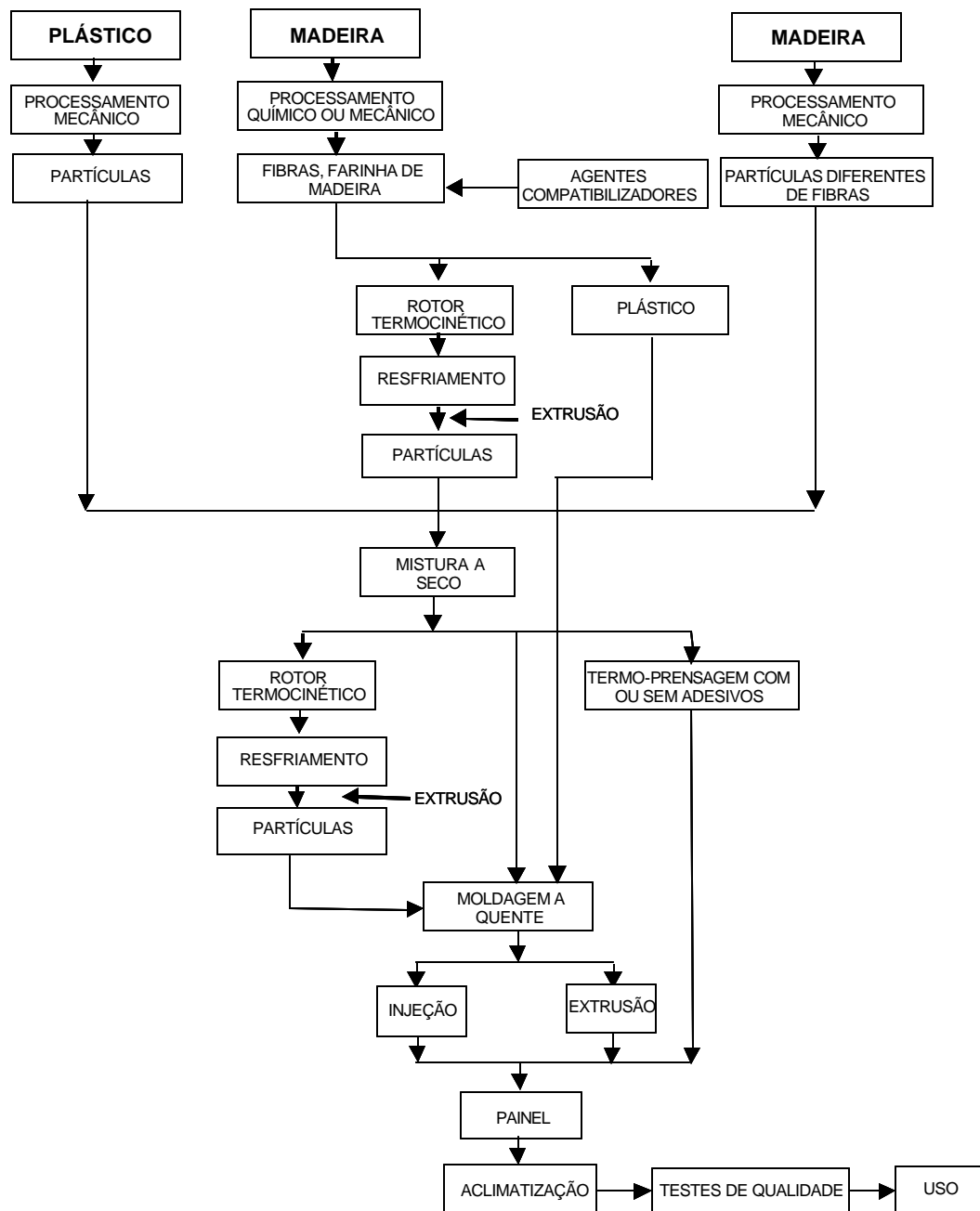


Figura 2 - Fluxograma de produção dos compósitos de plástico/madeira.

### 2.5.1. Elementos lignocelulósicos

Fibras e farinha de madeira (*wood flour*) são empregadas como elementos de reforço ou como cargas na elaboração de compósitos à base de plástico/madeira. Algumas características da madeira, como disponibilidade, baixo preço, baixa abrasividade, baixa densidade, boa resistência intrínseca e não-emanção de gases tóxicos durante o processo de produção, além de ser um material reciclável, são os fatores mais atraentes para sua utilização (SEAN et al., 1990). Os fatores negativos no emprego deste material como elementos de reforço para os polímeros termoplásticos devem-se principalmente às seguintes razões: incompatibilidade entre as fibras hidrofílicas da madeira e as superfícies hidrofóbicas dos plásticos; instabilidade térmica a temperaturas acima de 150 °C; instabilidade dimensional devido à excessiva absorção de água; separação das fases em condições de estresse em temperaturas abaixo de zero (KOKTA et al., 1986).

As partículas de madeira podem ser processadas comercialmente ou obtidas como materiais resultantes das operações pós-industriais de beneficiamento da madeira e, ainda, dos produtos à base de fibras lenhosas pós-consumo. Nesses casos, torna-se necessária sua transformação ao tamanho e à forma desejados para sua aplicação. Para isso, usam-se moinhos desfibradores e moinhos granuladores de martelos ou de bolas. A granulometria e a quantidade de matéria-prima empregada na elaboração dos produtos de plástico-madeira são expressas na literatura pertinente como estando compreendidas entre 40 e 100 mesh e variando de 5 a 50% em peso da mistura empregada, respectivamente (ENGLISH et al., 1996; LIANG et al., 1994). É interessante observar que as fibras de madeira, por sua menor densidade a granel (16-32 kg/m<sup>3</sup>), oferecem maiores dificuldades operacionais, quando comparadas às partículas de farinha de madeira de maior densidade. Contudo, a utilização de fibras lenhosas favorece a obtenção de produtos de melhor qualidade, e, nesses casos, elas atuam mais como elementos de reforço para a matriz de plástico do que como elementos de carga. Como material de reforço, as fibras podem melhorar a rigidez e a resistência dos compósitos plásticos e afetar positivamente sua estabilidade dimensional.

### 2.5.2. Composição da madeira

As madeiras de coníferas e de folhosas diferem significativamente, entre si, quanto aos seus elementos anatômicos constituintes. Algumas coníferas têm o volume de sua estrutura representado por cerca de 0,8% de canais de resina, possuem de 5 a 10% de células parenquimosas formadoras dos raios que atuam como elementos de reserva e 90 a 95% de traqueídeos, responsáveis pela resistência do lenho e pelo transporte de nutrientes. Os traqueídeos medem, em média, de 2,5 a 5,0 mm de comprimento e 30 a 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro (LEWIN e PRESTON, 1985).

De modo geral, as folhosas têm o volume de sua microestrutura formado por cerca de 49% de fibras com pontuações simples em suas paredes, 37% de vasos perfurados em suas extremidades e 14% de células de parênquima. Suas fibras medem em média de 0,5 a 1,5 mm de comprimento e 15-25  $\mu\text{m}$  de diâmetro (LEWIN e PRESTON, 1985).

As fibras, os vasos e os traqueídeos são constituídos, principalmente, de celulose, hemicelulose e lignina. Esses polímeros possuem grupos disponíveis de reação, sendo portanto sítios de grande interesse para reações de compatibilização entre a madeira e o plástico quando se empregam substâncias para melhorar a adesão entre estes dois materiais. Esses sítios de reação ou grupos funcionais são hidroxilas alifáticas e fenólicas, carbonilas, grupos carboxílicos, ligações carbono-carbono e ligações éter, presentes, em maior ou menor grau, nos três principais constituintes da madeira. Eventualmente, as substâncias compatibilizadoras podem reagir com esses grupos funcionais, alterando química ou fisicamente as superfícies naturais promovendo uma melhor adesão entre a madeira e o plástico, afetando, como conseqüência, as propriedades físico-mecânicas dos compósitos formados.

O desempenho de fibras celulósicas como elementos de reforço em produtos à base de plástico/madeira depende de suas características, isto é, comprimento da fibra, técnica de fabricação, morfologia, propriedades físicas e mecânicas, origem da fibra (MALDAS e KOKTA, 1991). As propriedades das

fibras são também afetadas pelo processo de produção. De modo geral, as fibras obtidas de polpas termoquimomecânicas (CTMP) são mais separadas e flexíveis que aquelas geradas pelo processo de polpação termomecânica (TMP), dando origem a compósitos de melhor desempenho.

Os compósitos termoplásticos de fibras longas são mais resistentes que os de fibras curtas, porém estes apresentam algumas características que os tornam mais vantajosos em várias aplicações. Os compósitos de fibras curtas podem ser processados em maquinarias comuns de plástico e podem ser preparados com qualquer tipo de fibra, natural ou sintética (HOSSEINY e PAGE, 1975). As propriedades dos compósitos de fibras curtas dependem das características da matriz, das fibras e da resistência da interface. A função principal da interface é transferir a tensão da matriz para as fibras, mais resistentes (RYBNIKÁR, 1991).

## **2.6. Resinas termoplásticas**

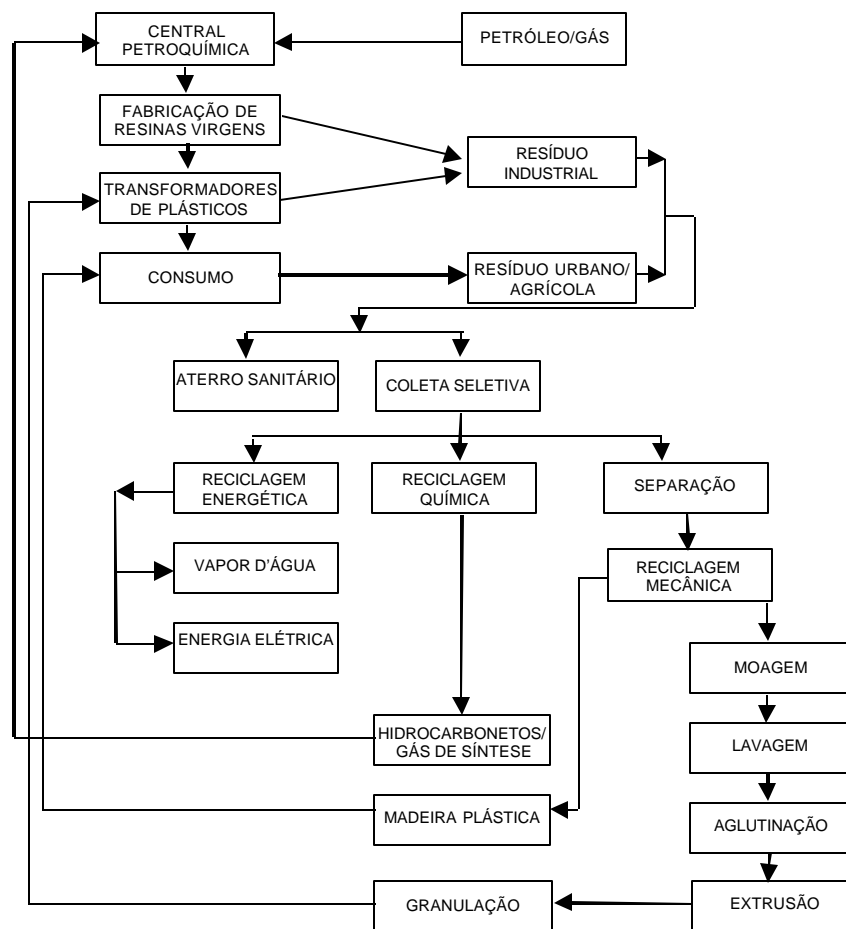
### **2.6.1. Plásticos**

São polímeros sintéticos formados por uma sequência de monômeros, que podem ser moldados, sendo líquidos em uma fase de sua existência.

Vários são os tipos de plásticos aptos para atuar como matriz, contínua ou descontínua, para as partículas de madeira; contudo, é de suma importância que fundam em temperaturas inferiores às da degradação térmica da madeira, normalmente próximo a 200°C exceto para ciclos curtos de exposição (ENGLISH et al., 1996). Estes plásticos incluem, dentre outros, o polipropileno e os polietilenos de alta e baixa densidade, que também são os plásticos mais consumidos em nível mundial.

Os termoplásticos empregados na produção de compósitos podem ser originados do material de refugo dos processos industriais de produção (recuperação primária) ou dos rejeitos pós-consumo (recuperação secundária). De qualquer forma, torna-se importante que estas resinas se encontrem disponíveis em quantidades suficientes para cobrir a demanda necessária e que apresentem a capacidade de fundirem nas temperaturas desejadas.

A matéria-prima termoplástica pode ser adquirida diretamente das indústrias de beneficiamento de plásticos, na forma de pellets, pó ou flakes, ou ser obtida em suas diversas formas de depósitos coletores, sendo, então, reprocessadas. Para isso, o material coletado passa por tratamentos de purificação, envolvendo várias operações, como seleção, corte, pré-lavagem, moagem, lavagem com água, remoção da água, secagem, estocagem, extrusão, granulação e embalagem, e pelo tratamento final da água de lavagem (MANO e BONELLI, 1994), onde entram em operação vários tipos de equipamentos, como sistema de transporte, aglutinadores, moinhos granuladores, trituradores, pelletizadores etc. Na Figura 3, apresenta-se o ciclo de produção e recuperação das resinas termoplásticas.



Fonte: extraído e adaptado de FURTADO (1996).

Figura 3 - Fluxograma de reciclagem de plásticos.

Na etapa inicial da cadeia petroquímica, conhecida como primeira geração a fração constituída por hidrocarbonetos de baixo ponto de ebulição (nafta), principalmente o eteno e o propeno são os principais produtos. Ambos são matérias-primas fundamentais para a produção, pelas indústrias de segunda geração, de resinas termoplásticas como os polietilenos (PE), poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC), entre outros, que após sucessivos processos industriais, serão transformados nos mais diversos artigos.

No processo de transformação dos derivados petroquímicos em matérias-primas específicas, são obtidos, como sobras dos processos de produção os resíduos industriais. Das transformadoras de plásticos são entregues ao mercado consumidor os mais variados produtos, na forma de envases, plásticos rígidos e plásticos-filme, que após serem usados, são descartados no ambiente como resíduos pós-consumo. Os dois tipos de resíduos, o industrial e o pós-consumo podem tomar dois destinos; ou são dirigidos para um aterro sanitário ou são seletivamente recuperados. O material recuperado pode ser reaproveitado de três formas distintas: como combustível, para a geração de vapor d'água e energia elétrica, inexistente no Brasil; como geradores de insumos básicos, como hidrocarbonetos e gás de síntese, para a central petroquímica; ou como matéria-prima para a indústria transformadora de plásticos, após passarem por um processo de seleção. Após selecionados, os plásticos reciclados são submetidos a uma série de operações, que envolvem moagem, fusão e granulação, quando são, então, entregues às indústrias de transformação. A reciclagem mecânica permite ainda, o aproveitamento das resinas termoplásticas para a produção de artefatos nos quais podem ser usadas fibras lignocelulósicas como elementos de reforço, dando origem a um novo tipo de produto, denominado madeira plástica; que volta ao mercado consumidor nas mais variadas formas.

Pelo exposto, percebe-se que teoricamente o ciclo de existência de um determinado plástico deveria ser fechado, isto é, a indústria produtora é também consumidora; entretanto, por uma série de razões, isso não ocorre.

### **2.6.2. Classificação dos plásticos**

Pela grande variedade de plásticos existente, torna-se necessário agrupar estas substâncias segundo suas características, a fim de facilitar seu entendimento

e o estudo de suas propriedades. Assim, com este objetivo, os plásticos são classificados de várias maneiras, de acordo com suas estruturas químicas, seu comportamento diante do calor, suas propriedades mecânicas, tipos de aplicação, escala de produção ou ainda por outras características (LUCAS, 1994). A seguir apresentam-se estas classificações e os conceitos pertinentes.

### 2.6.2.1. Quanto à estrutura química

De acordo com os tipos de monômeros presentes nas estruturas dos plásticos, estes podem ser classificados em:

- **Homopolímeros** – É o polímero constituído por apenas um tipo de unidade estrutural repetida. Se se considerar A como o monômero presente no homopolímero, sua estrutura poderá ser representada como:



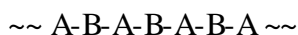
Como exemplos de homopolímeros têm-se polietileno (PE), poliestireno (PS), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliacetato de vinila (PVA) e outros.

- **Copolímeros** – São polímeros constituídos de mais de um tipo de monômeros. Se se considerar A e B como monômeros formadores da estrutura dos polímeros, pode-se classificar estes produtos em:
- **Copolímeros ao acaso ou aleatórios** – Os monômeros se distribuem na cadeia do polímero ao acaso, sem nenhum ordenamento.



Como exemplo desses copolímeros tem-se o estireno-acrilonitrila (SAN).

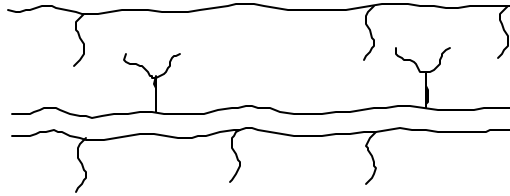
- **Copolímeros alternados** – Os monômeros A e B se alternam de forma regular na cadeia polimérica.



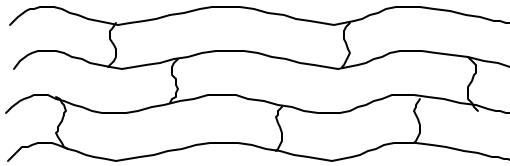




- **Ramificados** – Todas as moléculas contêm, inseridas em suas estruturas principais, pequenas cadeias laterais.



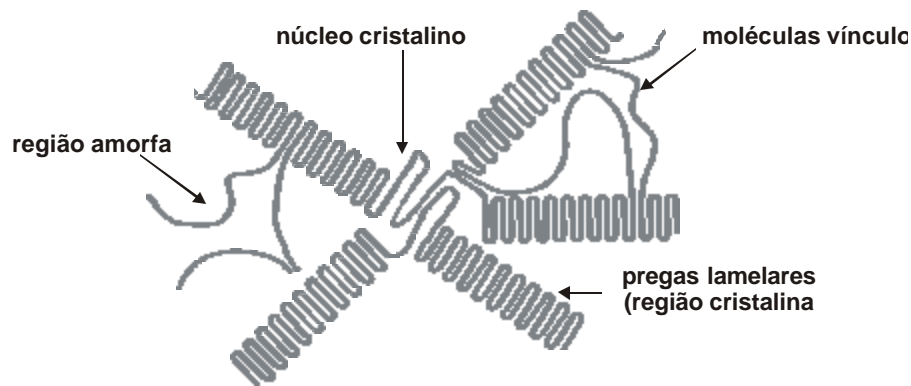
- **Entrecruzados** – Os polímeros possuem estrutura tridimensional, estando as cadeias unidas umas às outras por intermédio de ligações químicas.



### 2.6.2.3. Quanto à morfologia interna

Não existem plásticos que sejam totalmente cristalinos nem completamente amorfos. As cadeias lineares desses polímeros não estão perfeitamente distendidas, ao contrário, elas só se estendem linearmente por uma curta distância, para logo depois dobrarem sobre si mesmas, formando pregas lamelares, que caracterizam a cristalinidade do polímero. As regiões lamelares nem sempre estão tão organizadas; as cadeias, ou parte delas, não possuem nenhuma organização, e, neste caso, caracterizam um estado amorfo do polímero. Assim, um polímero tem na realidade dois componentes: a porção cristalina que está na forma lamelar e a fração amorfa, fora da lamela. Muitas vezes as lamelas se organizam na forma de pequenos esferulitos (Figura 4), onde estão presentes as regiões amorfas e cristalinas, representadas, respectivamente, pela porção linear e lamelar da cadeia polimérica (GEORGE, 1991).

Para a produção e aplicação dos plásticos, o estado parcialmente desorganizado das suas moléculas é uma característica interessante, pois a cristalinidade faz com que estes materiais sejam opacos e resistentes, porém quebradiços, enquanto as zonas amorfas conferem a esses produtos sua flexibilidade e transparência.



Fonte: GEORGE (1991).

Figura 4 - Representação esquemática de um esferulito.

Segundo LUCAS (1994), às regiões cristalinas e amorfas relacionam-se, também, a temperatura de fusão ( $T_f$ ) e a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), respectivamente. A  $T_g$  é exclusiva da região amorfa e representa a temperatura acima da qual um polímero se mostra macio e flexível, e abaixo da qual se torna duro e quebradiço, enquanto a  $T_f$  é da região cristalina.

A maioria dos polímeros apresenta uma mistura de zonas amorfas e cristalinas, porém alguns são altamente cristalinos e outros altamente amorfos. Como exemplos de polímeros altamente cristalinos podem ser citados o polipropileno, o poliestireno sindiotático e o náilon. Os altamente amorfos são o poli (metilmetacrilato), o poliestireno atático e o polibutadieno.

Quando o polímero é altamente cristalino, sua estabilidade dimensional é também elevada devido à dificuldade de destruição das regiões ordenadas resultantes da coesão molecular. A estabilidade dimensional do polímero é uma propriedade importante para a maioria das aplicações, pois evita prejuízos devido à variação nas dimensões desses polímeros.

#### 2.6.2.4. Quanto ao comportamento frente à temperatura

- **Termoplásticos** – São todos os plásticos que amolecem quando aquecidos e endurecem quando esfriados. Nos polímeros termoplásticos, as cadeias macromoleculares têm um tamanho microscopicamente finito. Suas cadeias são caracterizadas como seqüências em série de unidades monoméricas, tendo

início e fim de cadeia. Em sua grande maioria podem ser dissolvidos e são plastificados termicamente (semelhante a um processo de fusão). Exemplos desses tipo de plásticos são polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS) e outros..

- **Termofixos ou termorrígidos** – São todos os plásticos que, após endurecidos pela ação do calor ou catalisadores específicos, formam ligações entrecruzadas entre suas unidades, tornando-as insolúveis e infusíveis. Os polímeros termofixos, têm tamanho microscopicamente infinito. Não se pode identificar uma cadeia única e isolada, e são caracterizados por uma rede tridimensional formada pela união de vários segmentos de cadeia polimérica. Estes polímeros não se fundem, e a elevação de temperatura leva à sua decomposição térmica. Também não podem ser dissolvidos como os termoplásticos, porém sofrem um processo de inchaço (intumescimento) produzindo géis de polímero-solvente . Exemplos desses plásticos são as resinas à base de formaldeído, as resinas epóxi, os poliuretanos, os policarbonatos e outros.

#### 2.6.2.5. Quanto ao comportamento mecânico

- **Plásticos** (do grego moldável) – São materiais de origem sintética que podem ser moldados, sendo líquidos em uma fase de sua existência.
- **Elastômeros** (borrachas) – São plásticos de origem natural ou sintética, que se caracterizam pela propriedade de se distenderem muitas vezes do seu tamanho, quando sob a ação de uma força aplicada, voltando imediatamente à sua posição original cessada a força aplicada. Qualquer porção de borracha não tem nenhuma ordem. As moléculas se enrolam entre elas, formando um grande novelo. Entre os polímeros elastômeros encontram-se o poliisopreno, ou borracha natural, o polibutadieno, o poliisobutadieno e os poliuretanos.
- **Fibras** – Geralmente são constituídas de macromoléculas lineares que se mantêm orientadas longitudinalmente. As fibras caracterizam-se por possuir uma relação elevada entre o comprimento e o diâmetro. Exemplo típico de fibra é o náilon.

O comportamento mecânico dos plásticos pode ser influenciado por uma série de fatores, dentre os quais merecem destaque (LUCAS, 1994):

- **Composição química** – A composição química de um polímero determinará a sua temperatura de transição vítrea (Tg). A Tg está unicamente associada à região amorfa do polímero. Quanto maior a Tg de um plástico, mais dúctil ele será. Ao contrário, quanto menor sua Tg, mais frágil será seu comportamento mecânico.
- **Peso molecular** – Geralmente polímeros de elevado peso molecular apresentam cadeias longas, e estas, quando submetidas a esforços de tração, têm seu movimento, umas em relação às outras, dificultado, o que confere maior resistência a estes materiais.
- **Ramificações** – Nos polímeros ramificados, ocorre maior dificuldade no deslocamento de suas macromoléculas, quando submetidas à ação de uma força. Conseqüentemente, isso resulta em aumento da sua resistência mecânica.
- **Ligações cruzadas** – Polímeros que possuem estes tipos de ligação têm seu escoamento entre cadeias limitado, resultando em pouca deformação e aumento na sua resistência mecânica.
- **Cristalinidade** – Em polímeros que apresentam regiões cristalinas, à medida que cresce o valor de Tg, verifica-se maior mobilidade das regiões amorfas. No entanto, isso não se verifica nas regiões cristalinas, que se comportam como um fator limitante para este movimento. Dessa forma, quanto maior o grau de cristalinidade de um polímero ou maior o tamanho dos esferulitos (alterações da morfologia), maior será a resistência apresentada por este.
- **Orientação das moléculas** – À medida que um polímero vai sendo deformado, suas moléculas vão se orientando e dificultando cada vez mais a deformação. Assim, conclui-se que materiais poliméricos mais orientados molecularmente possuem maior resistência que aqueles com menor orientação.
- **Cargas** – Com o objetivo de baratear a fabricação de matrizes poliméricas, geralmente são adicionados aos polímeros materiais inorgânicos e, com eles, cargas nas cadeias que causam distorções localizadas. Isso gera no polímero o mesmo efeito do fator de cristalinidade, ou seja, reduz a mobilidade das

cadeias à medida que uma quantidade de cargas é adicionada, aumentando, dessa forma, a resistência mecânica do polímero.

#### 2.6.2.6. Quanto ao tipo de aplicação

Podem ser conhecidos como:

- **Plásticos de uso geral** (*commodities*) – São os plásticos empregados na elaboração de produtos comuns, como embalagens, envases etc.
- **Tecnopolímeros** (plásticos de engenharia) – São todos os plásticos que substituem os materiais convencionais, como madeira, aço e vidro, em aplicações estruturais. Um exemplo de tecnopolímero são os policarbonatos.

#### 2.6.3. Principais resinas termoplásticas

A seguir, apresentam-se, nos Quadros 2 e 3, as principais resinas termoplásticas pós-consumo, suas estruturas químicas e algumas de suas propriedades. Esses materiais podem ser encontrados na forma de envases, plásticos rígidos e plásticos-filme.







##### 2.6.3.1. Poliestireno cristal

O poliestireno é um polímero sintetizado, por meio de reações de poliadição, via radicais livres, a partir de monômeros vinílicos de estireno, que são pequenas moléculas contendo dupla ligação carbono-carbono. A reação de polimerização por adição, caracteriza-se por ocorrer em monômeros que contenham pelo menos uma dupla ligação, sendo a cadeia polimérica formada pela abertura desta, adicionando um monômero após outro.

Estruturalmente o poliestireno é uma longa cadeia hidrocarbonada com um grupo fenil ligado, alternadamente, a cada um de seus carbonos.

Todo o processo de síntese do poliestireno inicia-se com uma molécula chamada iniciador, usualmente o peróxido de benzofila. Na Figura 5 são mostradas as estruturas do estireno, do poliestireno e do peróxido de benzofila (GEORGE, 1991).







Quadro 2- Identificação, propriedades e usos dos principais termoplásticos

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



Símbolo utilizado para identificar outras resinas plásticas.

Quadro 3 - Reações de síntese e estrutura dos principais termoplásticos

TERMOPLÁSTICOS	ESTRUTURA
<b>1 - PET</b> 	$\left[ \text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{C}_6\text{H}_4-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_n$ <p style="text-align: center;">grupo tereftalato                      grupo etileno</p>
<b>2 - PEAD</b> 	$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} & \xrightarrow[\text{Ziegler - Natta}]{\text{polimerização}} & \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n \\ \text{ETILENO} & & \text{POLIETILENO} \end{array}$
<b>3 - PVC</b> 	$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array} & \xrightarrow[\text{via radicais livres}]{\text{polimerização}} & \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array} \right]_n \\ \text{CLORETO DE VINILA} & & \text{POLI CLORETO DE VINILA} \end{array}$
<b>4 - PEBD</b> 	$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} & \xrightarrow[\text{via radicais livres}]{\text{polimerização}} & \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n \\ \text{ETILENO} & & \text{POLIETILENO} \end{array}$
<b>5 - PP</b> 	$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} & \xrightarrow[\text{por metalocenos}]{\text{Ziegler-Natta ou polimerização}} & \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]_n \\ \text{PROPILENO} & & \text{POLIPROPILENO} \end{array}$
<b>6 - PS</b> 	$\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} & \xrightarrow[\text{via radicais livres}]{\text{polimerização}} & \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]_n \\ \text{ESTIRENO} & & \text{POLIESTIRENO} \end{array}$

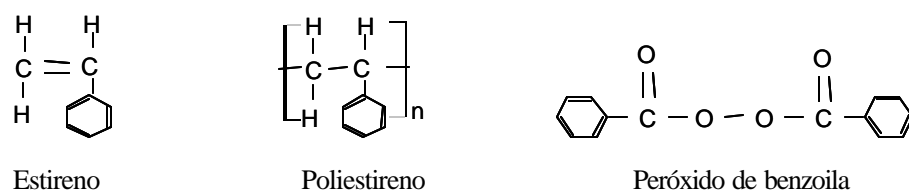


Figura 5 - Estrutura do estireno, do poliestireno e do peróxido de benzoíla.

Industrialmente, três tipos de meio de reação são utilizados, para a síntese do poliestireno: polimerização em massa; polimerização em suspensão aquosa; polimerização em emulsão.

A polimerização em massa é uma técnica simples, homogênea, onde só o monômero e o iniciador estão presentes no sistema. Em geral, é uma reação fortemente exotérmica, e a viscosidade cresce rapidamente, daí a importância de um controle rigoroso da temperatura no interior do reator.

Esta técnica é econômica, e permite obter polímeros com alto grau de pureza. A agitação durante a polimerização em massa é fundamental e deve ser vigorosa para que promova uma dispersão do calor de formação do polímero, que é a energia liberada ou absorvida quando um mol do composto se forma a partir de seus elementos constituintes, evitando assim pontos superaquecidos, que promovem na massa formada alteração de cor, gerando produtos de qualidade inferior.

A polimerização em massa apresenta a vantagem de gerar produtos de alto grau de pureza. Como desvantagens é a dificuldade em se controlar a temperatura de reação e a produção de polímeros com uma larga faixa de pesos moleculares.

Esta técnica permite a obtenção de peças moldadas diretamente a partir de monômeros, sem pressão, com excelentes qualidade óticas (MANO, 1960).

Na polimerização em suspensão ou em pérolas, o estireno é disperso em água quente utilizando-se colóides para manter a suspensão. A polimerização ocorre dentro das partículas em suspensão, as quais tem tamanho médio entre 2 e 10 mm, e no interior das quais se encontram o monômero e o iniciador. A agitação do sistema é fator preponderante nesta técnica, pois segundo a velocidade de agitação empregada, se varia o tamanho das partículas ou pérolas formadas.



Nesta técnica é comum adicionar ao meio de reação agentes tensoativos, substâncias químicas que mantêm em suspensão o polímero formado, evitando a adesão, entre as partículas e, conseqüentemente, a precipitação do polímero sem a formação das pérolas. A precipitação do polímero também pode ser evitada pela adição ao meio de reação de um polímero hidrossolúvel de elevado peso molecular, que aumenta a viscosidade do meio. Entretanto, a adição destas substâncias dificulta a purificação do polímero resultante.

A técnica da polimerização em suspensão apresenta as vantagens de um fácil controle de temperatura e de uma rápida produção de polímeros de elevados pesos moleculares médios (MANO, 1960).

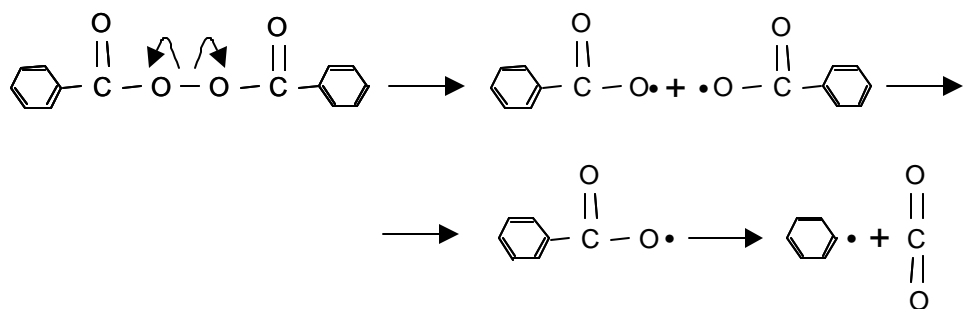
A polimerização em emulsão é uma polimerização heterogênea, onde o monômero e o iniciador são insolúveis no meio dispersante, requerendo por isso uma série de aditivos com funções específicas, como os emulsificantes tamponadores de pH, colóides reguladores de tensão superficial, reguladores de polimerização e ativadores. Nesta polimerização o iniciador é solúvel em água, ao contrário do monômero que é insolúvel. O emulsificante tem como objetivo formar micelas, de tamanhos variando entre 1 nm e 1mm, no interior das quais se encontra o monômero.

A polimerização em emulsão tem uma alta velocidade de reação e conversão, sendo de fácil controle de agitação e temperatura. Os polímeros obtidos por esta técnica apresentam altos pesos moleculares, mas são de difícil purificação devido à quantidade de aditivos adicionados.

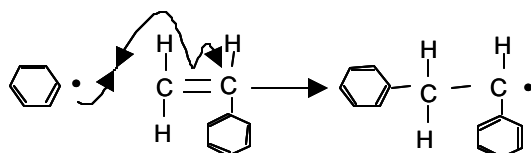
A polimerização em massa, em suspensão e em emulsão, requerem temperaturas de reação variando entre 60 e 90 °C (BÜHRER, 1966).

### **2.6.3.2. Síntese do poliestireno cristal**

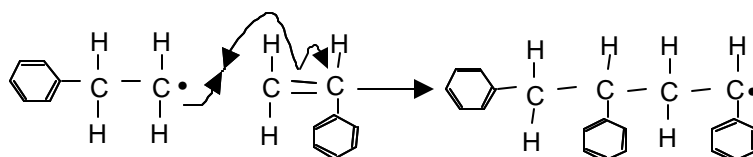
Todo o processo de síntese do poliestireno cristal começa com uma molécula de iniciador, como o peróxido de benzoíla, que sob condições controladas de temperatura sofre uma cisão homolítica dando origem a dois fragmentos denominados fragmentos de iniciador, cada um com um elétron desemparelhado, que recebem o nome de radicais livres (LUCAS, 1994)



Os radicais livres por seu desequilíbrio eletrônico tendem a reagir com qualquer substância doadora de elétrons. A dupla ligação carbono-carbono de um monômero vinílico como o estireno, tem um par eletrônico susceptível de ser facilmente atacado por um radical livre. Assim, o elétron desemparelhado, do radical livre, ao se aproximar do monômero de estireno, desorganiza esta estrutura, abrindo a dupla ligação pelo emparelhamento de seu elétron com um dos elétrons do estireno. O outro elétron da dupla ligação, sem ter para onde ir, se associa ao átomo de carbono que contém o grupo fenil, gerando, assim, nova molécula de radical livre. O processo completo, desde a ruptura da molécula de iniciador, para gerar radicais, até a reação do radical com uma molécula de estireno, denomina-se etapa de iniciação da polimerização.

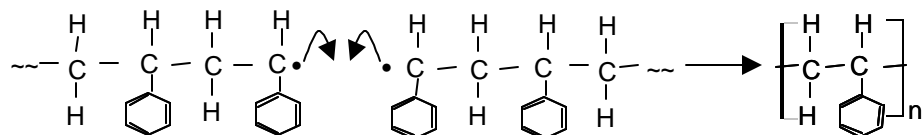


Como o novo radical formado é também altamente instável ele reage com outra molécula de estireno, gerando assim, por propagação, sucessivas e maiores estruturas de radicais livres.



Como a cadeia não pode se auto-perpetuar indefinidamente e os elétrons desemparelhados do radical livre precisam de se equilibrar eletronicamente, eles se unem a outro radical livre detendo o crescimento da cadeia. Isto pode acon-

tecer de várias maneiras. A mais simples consiste em que se encontrem duas cadeias em crescimento. Os elétrons desemparelhados se unirão para formar um par e se estabelecerá uma nova ligação química que unirá as respectivas cadeias. Isto se chama acoplamento. O acoplamento é uma das duas classes principais de reações de terminação. A terminação é a terceira e última etapa de uma polimerização por crescimento na cadeia.



O poliestireno pode ter uma estrutura sindiotática que é aquela na qual os grupos fenil da cadeia polimérica estão unidos alternadamente a ambos os lados da mesma. É um tipo de estireno especial que apresenta ponto de fusão na ordem de 270 °C.

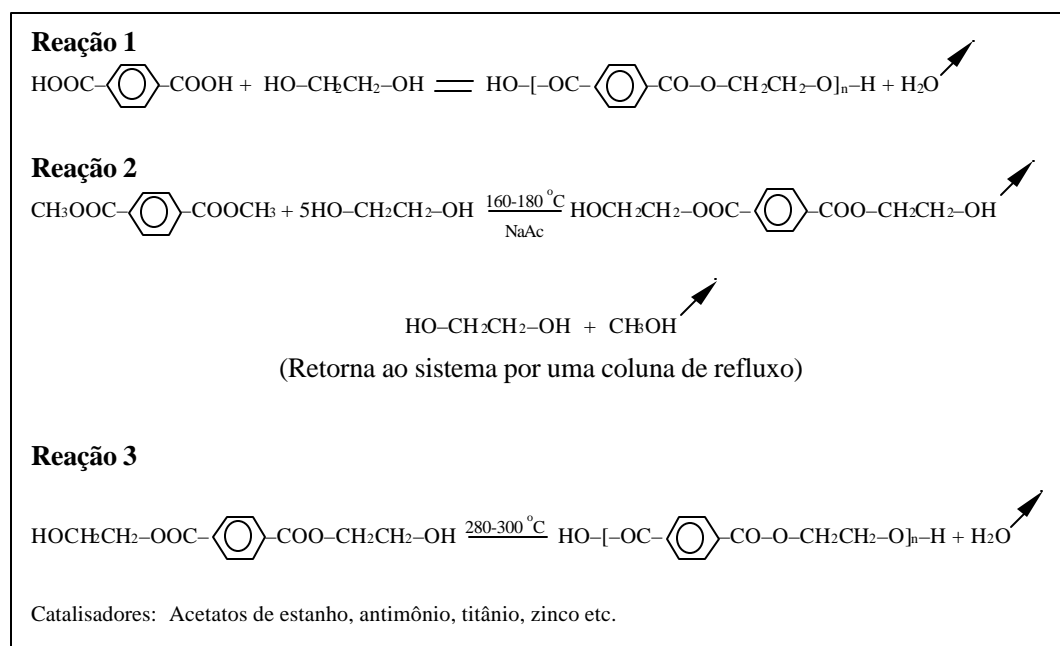
O poliestireno comum ou poliestireno atático não conserva nenhuma ordem com respeito ao lado da cadeia onde estão unidos os grupos fenil.

No seu estado original, o poliestireno é um plástico rígido, duro, incolor e transparente, semelhante ao vidro. A sua transparência se deve à baixa cristalinidade de sua estrutura permitindo a transmissão de 90% da luz visível. O material tem um som tipicamente metálico quando deixado cair sobre uma superfície dura. É um material bastante quebradiço e pode ser reforçado com borracha originando polímeros de enxerto, que são para aplicações mais severas.

O poliestireno apresenta excelente resistência ao ataque químico por ácidos fortes e álcalis. É insolúvel em hidrocarbonetos alifáticos e nos álcoois inferiores. É no entanto solúvel em ésteres, hidrocarbonetos aromáticos, álcoois superiores e hidrocarbonetos clorados. São fáceis de trabalhar e significativamente resistentes ao calor (BÜHRER, 1966).

### 2.6.3.3. Polietileno tereftalato (PET)

O PET é industrialmente obtido a partir de uma série de reações de policondensação entre o ácido tereftálico (TPA), ou tereftalato dimetila (DMT), e o etileno glicol (EG) (reação 1, Figura 6), todos derivados petroquímicos (NASCIMENTO et al., 1996).



Fonte: NASCIMENTO et al. (1996).

Figura 6 - Reações de obtenção de PET.

Num primeiro estágio de reação, o TPA, ou DMT, é adicionado com excesso de EG, na presença de um catalisador, levando à formação de um intermediário, o tereftalato de bis-hidroxietila (BHET) (reação 2). Após a adição de estabilizantes e aditivos, o BHET é filtrado e admitido no estágio de pré-policondensação. Este estágio é realizado sob vácuo (15-25 torr) e temperaturas elevadas (280-300 °C), gerando, após aproximadamente duas horas de reação, um polímero de baixo peso molecular (reação 3), da ordem de 12.000 a 20.000, e

com viscosidade intrínseca (VI) em torno de 0,65 dl/g (NASCIMENTO et al., 1996). Neste estágio, o polímero é adequado para a produção de fibras têxteis e filmes (CETEA, 1977). A aplicação do PET para embalagens sopradas (garrafas) requer um polímero com peso molecular acima de 30.000 a 35.000 (VI superior a 0,74 dl/g), o que não é possível de obter apenas com o processo de policondensação; logo, para adequar esta resina a essas aplicações, uma etapa adicional de polimerização, conhecida como polimerização em estágio sólido ou pós-condensação, é introduzida. Nesta etapa, *pellets* passam inicialmente por um tratamento térmico a 160-170 °C, com o propósito de promover uma cristalização parcial e a evaporação de voláteis, sendo em seguida submetidos a um aquecimento por 16 horas a cerca de 215 °C, em um reator de atmosfera inerte (com nitrogênio), tendo assim seu grau de cristalinidade aumentado. Quanto maior o grau de cristalinidade, maior a rigidez (menor resistência ao impacto), maior a resistência térmica e menor a transparência (CETEA, 1977).

## **2.7. Aditivos compatibilizadores**

As técnicas tradicionais empregadas na produção de compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas exigem a fusão da resina termoplástica para obtenção do produto desejado. No entanto, o plástico fundido é completamente imiscível com as partículas de madeira, levando, por isso, ao surgimento de regiões de alta energia interfacial (tensão superficial) entre a massa de plástico e as superfícies das unidades celulósicas. Na tentativa de melhorar a interação entre as superfícies desses dois materiais, são comumente adicionadas ao sistema plástico/madeira substâncias compatibilizantes que atuam como elo entre as superfícies hidrofóbicas (apolares) do plástico e hidrofílicas (polares) da madeira, promovendo, assim, a redução da energia de repulsão entre as fases presentes e, conseqüentemente, fortalecendo as linhas de adesão entre estes dois constituintes, gerando produtos de melhor qualidade (SIMONSEN et al., 1997).

As substâncias empregadas com este propósito podem ser classificadas em dois grupos: os copolímeros elastômeros ou modificadores de impacto, que

são borrachas que proporcionam certo grau de flexibilidade à estrutura do produto elaborado; e os copolímeros compatibilizadores ou agentes de ligação, que promovem certa rigidez nos compósitos de plástico-madeira. A utilização desses produtos como agentes de ligação tem relação direta com miscibilidade dos plásticos. Sabe-se que só uns poucos pares de polímeros se misturam. No entanto, ao se usarem estas substâncias numa mistura polimérica heterogênea, elas, por sua polaridade, tendem a ligar uma de suas cadeias a um dos polímeros presentes e a outra parte da cadeia ao outro polímero, levando a mistura a ter um comportamento similar ao dos polímeros entrecruzados (termorrígidos). Contudo, não podem ser considerados como tais, pois, ao se fundir novamente a mistura, as ligações efetuadas se rompem e as cadeias de polímeros começam a mover-se livremente, caracterizando, dessa forma, o estado de uma resina termoplástica (DYACHKOVSKII, 1993).

Os copolímeros elastoméricos apresentam comportamento peculiar, uma vez que, em baixas concentrações, atuam como pontos concentradores de tensões em locais da matriz de plástico, impedindo, com isso, que esta se rompa ou se fissure ao menor esforço de tensões. Estes modificadores de impacto podem atuar na matriz de plástico como uma terceira fase existente ou podem cobrir parcial ou totalmente as unidades de madeira, ou ainda ter um comportamento combinado com duas formas anteriores

Uma significativa linha de pesquisa envolvendo a produção de compósitos reforçados com biofibras, empregando substâncias compatibilizadoras, pode ser encontrada na literatura. Não existe, porém, uma formulação definida do conteúdo a ser usado em uma determinada mistura, nem a especificidade para um determinado tipo de plástico, o que demanda experimentos prévios. Entretanto, é comum encontrar valores para estas substâncias variando de 0,5 até 10%, em relação ao peso da mistura plástico/madeira empregada.

Como agentes de ligação, são comercialmente disponíveis e empregados como substâncias capazes de melhorar as propriedades físicas/mecânicas dos compósitos de plástico/madeira o polipropileno maleatado (PPMA) que consiste de polipropileno enxertado com anidrido maléico, o terpolímero etileno/propileno/dieno (EPDM), o etileno/poliestireno/polimetacrilato (PS-PMMA), poliesti-

reno/poli (acetato de vinila) (PS-EVA), poli[metileno (polifenil isocianato)] e silanos ( $X_3Si(CH_2)_n Y$ ), em que n, varia de 0 a 3; X é um grupo alcóxi hidrolisável e Y é um grupo organofuncional; e os copolímeros ionômeros de sódio e zinco. Como elastômeros modificadores de impacto são utilizados principalmente o estireno/butadieno/estireno (SBS), o estireno-etileno/butadieno-estireno (SEBS), a borracha acrilonitrila/butadieno (NBR) e o poliisobutileno (PIB) (DALVÄG et al., 1985; KARMAKER e YOUNGQUIST, 1986; HAN et al., 1989; MALDAS et al., 1990; KRZYSIK et al., 1991; KRISHNAN e NARAYAN, 1992; LIANG et al., 1994; OKSMAN, 1994; OKSMAN e CLEMONS, 1998).

Os mecanismos de adesão entre as fibras de celulose e as substâncias compatibilizadoras se devem às ligações químicas entre os grupos hidroxil da celulose e os grupos específicos presentes na estrutura do agente compatibilizador. No PPMA, por exemplo, sítios de ligação estão disponíveis na molécula do anidrido maléico, provocando a grafitação superficial, onde fica ligado por ligações covalentes do tipo éster às fibras lenhosas (FELIX e GATENHOLM, 1991). Um mecanismo para a reação de modificação de fibras lignocelulósicas com polipropileno maleatado pode ocorrer em duas etapas (KRISHNAN e NARAYAN, 1992). Neste processo (Figura 7), o iniciador, geralmente um peróxido, inicia, em condições controladas de temperatura, a formação de radicais livres na estrutura do polipropileno através de abstração de hidrogênio e cisão da cadeia. O radical gerado reage com o anidrido maléico para formar o polipropileno maleatado que em estágios subseqüentes reage com uma hidroxila do componente celulósico formando um copolímero grafitado. A formação de ligações cruzadas neste processo é desprezível. No caso do copolímero SEBS, o poliestireno (PS) interage com as cadeias de celulose, e a parte do copolímero etileno/butadieno interage com um outro polímero, como, por exemplo, o polietileno. O mecanismo de compatibilização, neste caso, entre o não muito polar estireno e a celulose, pode ser afetado pelos efeitos de repulsão, devido ao fato de os parâmetros de solubilidade da celulose e os do estireno não serem similares, ou pela grafitação (ligações químicas) carbono-carbono, devido à alta temperatura de processamento (LIPTAKOVA et al., 1991).

A adesão entre dois substratos é um fenômeno complexo, e ainda não completamente elucidado, que envolve processos físicos e moleculares. De uma maneira geral, os modelos mais usados para explicar o fenômeno da adesão, podem ser divididos em adesão mecânica e adesão específica (FOURCHE, 1995). Em ambos os tipos os requisitos essenciais para uma boa adesão, envolve basicamente; grau adequado de umedecimento da superfície do substrato pelo adesivo e sua conseqüente penetração nos interstícios da superfície; solidificação do adesivo e a suficiente flexibilidade da massa polimerizada, a fim de reduzir os efeitos das tensões elásticas quando submetida a esforços localizados.

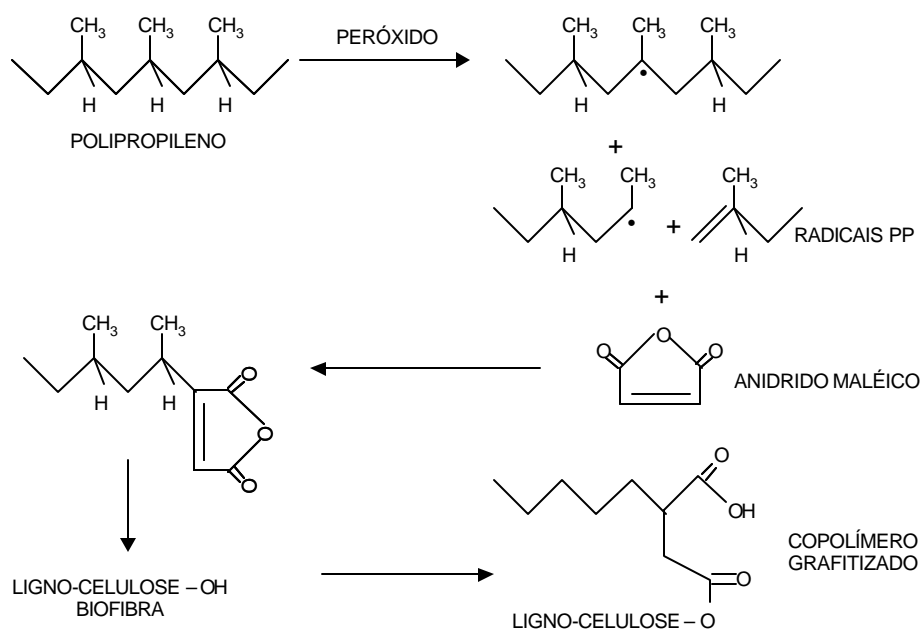


Figura 7 - Processo em duas etapas para modificação de fibras lignocelulósicas.

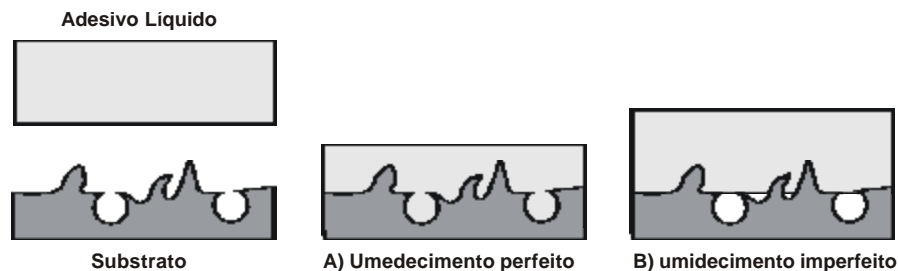
A adesão mecânica é o resultado do enganchamento (interlocking) mecânico de polímeros em poros ou asperezas presentes nas superfícies dos substratos.

A Figura 8 mostra os princípios dessa teoria proposta por McBain (FOURCHE, 1995) que se caracteriza pela penetração espontânea do adesivo, por capilaridade, para o interior dos interstícios do substrato tomando seu contorno e dificultando sua saída após a solidificação do adesivo. O enganchamento mecânico não é, em si, um mecanismo de adesão molecular, mas sim uma técnica para aumentar a adsorção do adesivo à superfície de um substrato.

A adesão específica engloba, dentre outros modelos, o da difusão, de



adsorção termodinâmica, e o da adesão química.



Fonte: Adaptado de FOURCHE (1995).

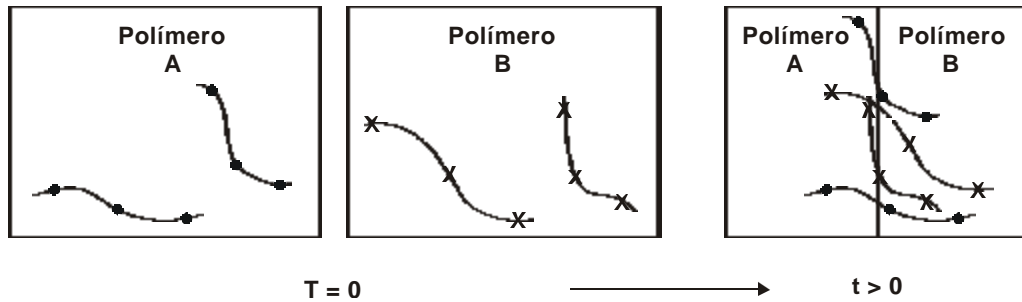
Figura 8 - Umedecimento e penetração de um adesivo nos poros e asperezas de um determinado substrato.

A teoria da difusão foi proposta por Voyutskii (FOURCHE, 1995) em 1949 e explica a adesão entre polímeros idênticos quando em perfeito contato, pela interpenetração de cadeias poliméricas nas camadas superficiais dos substratos. Neste caso, é imprescindível que estas superfícies sejam solúveis e compatíveis e que as macromoléculas apresentem alta mobilidade a uma adequada temperatura. De acordo com esse modelo, a adesão de duas macromoléculas em contato íntimo resulta na interdifusão, iniciada por suas extremidades, destas moléculas nas camadas superficiais. Essa interdifusão permite a formação de uma zona de transição, ou interface entre as duas superfícies. A profundidade média  $X$  da interpenetração de uma fase na outra é dada pela expressão:

$$X \propto \exp(-E/2RT) t^{1/2}$$

onde  $E$  é a energia de ativação da difusão,  $R$  é a constante molar das gases,  $T$  é a temperatura absoluta e  $t$  o tempo de contato. Quanto maior o tempo de contato maior a interdifusão através da interface. Na Figura 9 está representado o modelo da adesão por difusão.

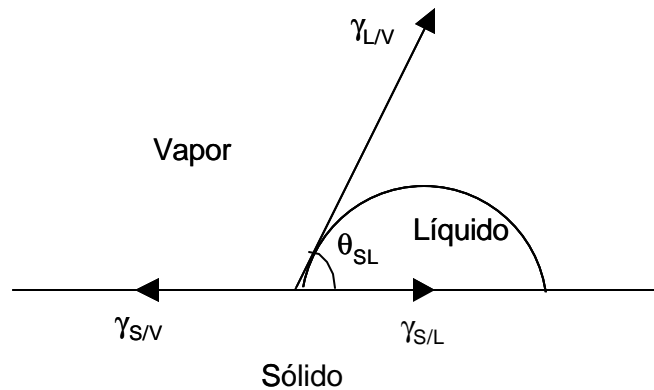
A adesão por adsorção termodinâmica foi desenvolvido por Sharp e Shonhorn (FOURCHE, 1995) em 1963. Este modelo propõe que a adesão entre dois sólidos, em contato íntimo, é resultante de interações de natureza física que ocorrem entre as superfícies dos dois substratos. Este modelo é também chamado de modelo de molhamento (*wetting model*) já que, normalmente requer o contato líquido-sólido.



Fonte: Adaptado de FOURCHE (1995).

Figura 9 - Interdifusão molecular entre dois polímeros, gerando uma região interfacial.

Quando uma gota de líquido (L) é depositada sobre uma superfície sólida polida e plana ela, quando em equilíbrio com seu vapor (V) tende a tomar uma configuração de tal modo a minimizar a energia do sistema e favorecer as interações entre as superfícies do líquido e do sólido. Em 1805, Young propôs a representação vetorial mostrado na Figura 10, das energias interfaciais sólido-líquido-vapor num sistema em equilíbrio.



Fonte: FOURCHE (1995).

Figura 10 - Modelo Young para o equilíbrio sólido/líquido/vapor.

Supondo que as diversas forças superficiais podem ser representadas por tensões superficiais, atuando na direção das superfícies, pode-se organizar os componentes vetoriais horizontais como descritos pela Equação 1.

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos\theta \quad (1) \quad \text{Eq. de Young}$$

onde,  $\gamma_{SV}$  é a energia superficial (tensão superficial) do sólido em contato com o vapor do líquido;  $\gamma_{LV}$  é a energia superficial do líquido em contato com seu vapor;  $\gamma_{SL}$  é a energia interfacial sólido-líquido e  $\theta$  é o ângulo de contato do líquido com o sólido.

Da equação de Dupré, a energia de adesão reversível, isto é, o decréscimo de energia livre de superfície que ocorre quando se forma a interface adesivo-substrato, de uma gota de líquido em repouso em uma superfície sólida é dada pela Equação 2.

$$W_{SL} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (2) \quad \text{Eq. de Dupré}$$

onde,  $W_{SL}$  é o trabalho termodinâmico de adesão, definido como o trabalho necessário para se separar a interface líquido-sólido.

Logo, das equações (1) e (2), obtém-se a equação de Young-Dupré.

$$W_{SL} = \gamma_{LV} (1 + \cos\theta) \quad (3) \quad \text{Eq. de Young-Dupré}$$

Por esta equação, tem-se um ângulo de contato nulo quando as forças de atração líquido/sólido forem iguais ou maiores que as forças de coesão entre as moléculas do líquido. Ao contrário, tem-se um ângulo de contato finito quando o líquido adere ao sólido com força menor do que as forças que causam sua própria coesão.

Assim, o sólido se mostrará completamente umedecido pelo líquido se o ângulo de contato for nulo, isto é, a energia de adesão é maior ou igual à energia de coesão do líquido e somente parcialmente umedecido se o ângulo de contato tiver um valor finito.

A eficiência do umedecimento do sólido pelo líquido é usualmente referida usando noção de tensão superficial crítica ( $\gamma_C$ ). Esse parâmetro corresponde à tensão superficial de um líquido,  $\gamma_L$ , que se espalharia completamente em sólido ( $\theta = 0$ ). Então, um líquido molha perfeitamente a superfície do sólido quando a tensão crítica do sólido é maior ou igual à tensão superficial do líquido.

A adesão através de ligações químicas, segundo esta teoria, se dá por meio de ligações primárias (iônicas, covalentes, coordenadas e metálicas) e, ou, atra-

vés das forças secundárias intermoleculares (forças de Kaeson, Debye e London); geradas na região interfacial dos substratos em contato. As ligações químicas covalentes correspondem a interações de alta energia (60 a 700 KJ.mol<sup>-1</sup>) se comparadas às energias de interação físico-químicas (2 a 40 KJ.mol<sup>-1</sup>). A adesão devido à formação de ligações químicas na interface de dois materiais é portanto muito forte (FOURCHE, 1995).

Em 1961, Bikerman citado por FOURCHE (1995), demonstrou que durante a separação de um sistema aderido é muito pouco provável que a ruptura ocorra exatamente na interface. Na verdade, a fratura é propagada na superfície de contato dos dois sólidos. Este fato foi também confirmado por LIPTAKOVA et al. (1991) ao estudarem o fenômeno da adesão em um sistema madeira/poliestireno. Os autores concluíram que aproximadamente 60% da adesão se deve ao efeito de forças de dispersão e o restante às forças polares. Forças não compensadas no substrato da madeira, geram tensões superficiais na interface madeira/plástico, sendo propagadas para a superfície do poliestireno que passa a ser a região mais frágil do sistema.

## 2.8. Mistura dos constituintes

A mistura dos ingredientes necessários para a produção dos compósitos de plástico e madeira pode ser feita de vários modos. Um procedimento comum é adicionar às partículas de madeira o aditivo, na forma de pó, homogeneizando a mistura em equipamentos misturadores. A seguir, acrescenta-se o plástico na forma de pellets, conduzindo a mistura efetuada para o equipamento formador.

Uma operação que pode ser previamente executada com a mistura de plástico/madeira é sua aglutinação pela ação do calor. Para isso, estes constituintes são depositados no interior de um rotor termocinético, que gira em alta velocidade, gerando calor, por atrito, suficiente para fundir parcialmente o material plástico que agrega, neste processo, as partículas de madeira. O produto obtido, após esfriado, é transformado em *pellets*, que podem ser armazenados para uso posterior (YOUNGQUIST et al., 1993).

Uma consideração importante deve ser levada em conta quando se mistura

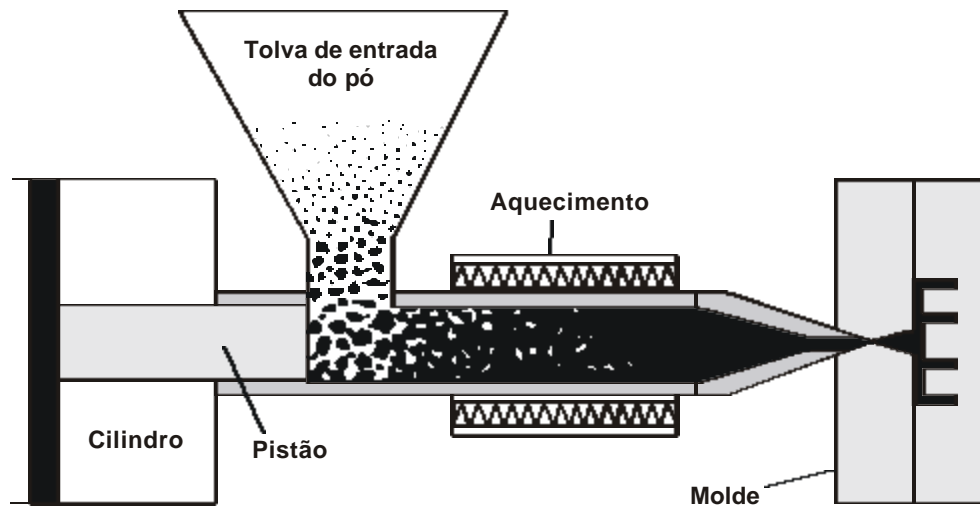
plástico com madeira. Os métodos de produção desses compósitos toleram pouca ou nenhuma água. Assim, a mistura desses constituintes deve apresentar, no momento de seu processamento, um teor de umidade de no máximo 3% ou menos (ENGLISH et al., 1996).

## **2.9. Tecnologias de produção**

Os compósitos termoplásticos podem ser obtidos segundo dois critérios de produção: compósitos com alto conteúdo de plásticos e compósitos com baixo conteúdo de plásticos.

### **2.9.1. Compósitos com alto conteúdo de plásticos**

Um grande número de procedimentos tecnológicos podem ser associados a estes tipos de compósitos termoplásticos. Entretanto, as duas maiores tecnologias envolvem a produção desses produtos pela moldagem por injeção ou extrusão. Na técnica da injeção, a máquina injetora (Figura 11) é constituída, essencialmente, de um pistão contido em um cilindro aquecido por meio de resistências; de duas placas, para sustentação do molde; e de um sistema hidráulico ou mecânico de acionamento da rosca de encosto das placas. A matéria-prima na forma de pellets, é adicionada através de um funil instalado sobre o cilindro da injetora. O material é conduzido pelo movimento do pistão, processo durante o qual é aquecido até o interior do molde por meio de orifício de injeção.

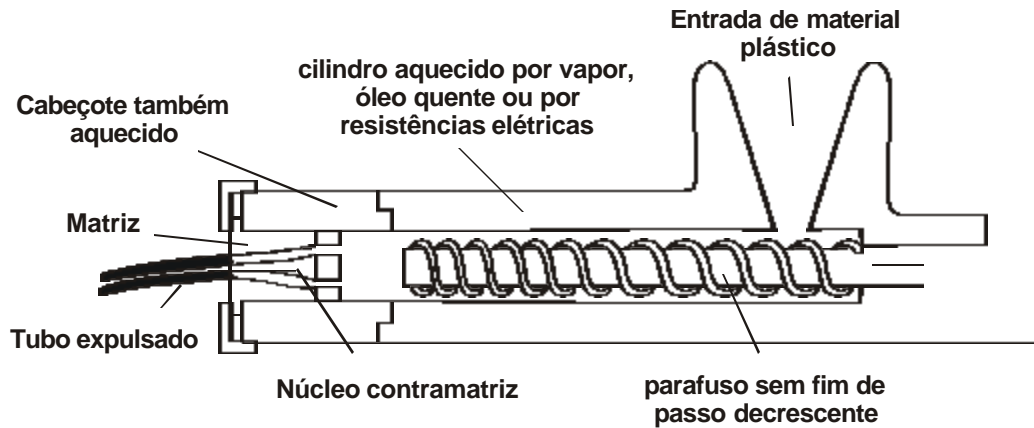


Fonte: BÜHRER (1966).

Figura 11 - Esquema simplificado de uma injetora.

Com o molde fechado, submetido à pressão, o material preenche integralmente as cavidades, adquirindo a conformação final. Após o resfriamento das peças no interior do molde, estas são removidas pela ação de pinos extratores.

No processo de extrusão (Figura 12), o material fragmentado é inicialmente colocado em um funil, passando a seguir por uma câmara de aquecimento e, posteriormente comprimido por meio de roscas helicoidais, simples ou duplas, acionadas por motor através de uma matriz, sendo o produto formado resfriado por jato de ar ou água ao sair do extrusor. O eixo das roscas helicoidais é oco, e aquecido internamente por circulação de vapor de água.



Fonte: BÜHRER (1966).

Figura 12 - Esquema simplificado de uma extrusora.

Uma das grandes vantagens do processo de extrusão é a de permitir a fabricação de peças de comprimento ilimitado, com perfis definidos ou variáveis de acordo com as matrizes utilizadas.

Nos compósitos com alto conteúdo de termoplásticos, o componente termoplástico é uma matriz contínua e o componente lignocelulósico atua como reforço ou carga. Nas operações de injeção e extrusão, a temperatura, a pressão e o tempo de saída da massa fundida e o tipo de plástico empregados são pré-requisitos imprescindíveis para obtenção de produtos de boa qualidade. Temperaturas elevadas podem causar degradação das fibras lenhosas.

Os dois processos de produção, por questões operacionais, exigem polímeros com características especiais; assim, a moldagem por injeção requer um polímero com baixo peso molecular para manter a baixa viscosidade da massa. Em contraste, a extrusão requer um polímero com alto peso molecular para manter melhor resistência do fundido (ENGLISH et al., 1986).

### 2.9.2. Compósitos com baixo conteúdo de plásticos

Nos compósitos com baixo conteúdo de termoplásticos, o material plástico atua de modo similar ao das resinas termoendurecíveis, empregadas nos

convencionais produtos de madeira reconstituída, que fazem a ligação dos componentes lignocelulósicos.

Neste caso, as resinas termoplásticas fornecem uma matriz descontínua, em que o material lenhoso é predominante. Experimentalmente, os compósitos de baixo conteúdo de termoplásticos têm sido produzidos de modo muito similar ao das chapas de partículas de madeira aglomerada.

Dessa forma as partículas de madeira podem ser ligadas a seco com grânulos, flocos ou fibras termoplásticas que, quando misturados, com a presença ou não de adesivos termofixos e agentes compatibilizadores, são termo-prensados, durante tempo suficiente para fundir o plástico ou curar a resina termoplástica e sem causar sérias degradações térmicas às fibras de madeira (normalmente três minutos).

Dependendo da densidade desejada, pressões acima de  $1,02 \text{ kgf/cm}^2$  são aplicadas na compressão da manta. Em não se usando adesivos termoendurecíveis, as chapas são removidas da prensa ainda quentes, sendo, neste estado, novamente prensadas à temperatura ambiente, de forma a obter a densidade desejada. A densidade final do produto elaborado é conseguida pelo aumento da pressão aplicada no momento do resfriamento das chapas.

A avaliação da qualidade final desses produtos é determinada ao final de no mínimo cinco dias de exposição às condições do ambiente, quando então amostras padronizadas são retiradas de cada painel, em teste, tendo suas propriedades físico-mecânicas determinadas.

Nos compósitos com baixo conteúdo de resinas termoplásticas, é comum o uso de até 90% de fibras lenhosas, em relação ao peso do plástico empregado, sendo o teor de umidade das fibras de madeira igual àquele usualmente empregado nas chapas duras, isto é, 6% (GEIMER et al., 1993). Outras estratégias de produção podem ser empregadas para a elaboração desses produtos.

## **2.10. Avaliação dos compósitos termoplásticos**

Os compósitos termoplásticos, após elaborados, são deixados nas condições de ambiente, tendo, posteriormente, suas propriedades físico/mecânicas



avaliadas, normalmente, de acordo com as normas-padrão da ASTM para plásticos. Para a avaliação da qualidade dos produtos com baixo conteúdo de plásticos podem ser, também, utilizadas as especificações da norma ASTM – D 1037, específicas para as chapas de partículas de madeira aglomerada. As propriedades dos compósitos de plástico/madeira podem variar significativamente entre estes compósitos, dependendo sobretudo de algumas variáveis, como tipo de plástico empregado, forma e peso das frações constituintes, tipos de aditivos e técnica de produção. O Quadro 4 mostra algumas propriedades avaliadas em compósitos de plástico/ madeira, à base de polipropileno, fibras e farinha de madeira.

Quadro 4 - Propriedades mecânicas dos compósitos de plástico - polipropileno

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

Fonte: adaptado de FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

Pela tabela apresentada, percebe-se a importância do tipo de partícula de madeira e, principalmente, a influência positiva dos agentes de ligação em todas as principais propriedades avaliadas neste tipo de compósito, exceção feita para o módulo de elasticidade em flexão.

### 2.11. Emprego dos compósitos termoplásticos

Os compósitos de plástico/madeira oferecem uma série de vantagens, se comparados, por exemplo, aos produtos convencionais de

madeira aglomerada. A estrutura do material plástico, pela proteção que oferece às partículas de madeira, permite o emprego desses produtos nas condições adversas do meio ambiente. Efeitos de umidade e de ataque de microrganismos e insetos são mínimos. A matriz de plástico, que é impermeável, envolve parcial ou totalmente as partículas de madeira, protegendo ou impedindo que se expanda, aumentando com isso a estabilidade do produto elaborado. Além disso, são leves e apresentam boa resistência aos esforços de impacto (ENGLISH et al., 1996).

Algumas razões ou vantagens no emprego desses materiais são a baixa necessidade de manutenção requerida, a ausência de agentes preservativos para sua proteção e a não-liberação de substâncias voláteis tóxicas ao longo de sua vida útil, o que não acontece com os produtos de madeira reconstituída elaborados com adesivos à base de formaldeído, que é gradualmente liberado no meio onde atuam.

Os compósitos de plástico/madeira são produzidos segundo os mais variados perfis, sendo empregados para os mais diversos fins, como pranchas para cobertura de pátios, mesas, bancos de jardim, brinquedos para parques infantis, revestimentos antiderrapantes, vasos para flores, painéis automotivos, cabides, pisos isolantes, caixotes, laterais de caminhão, barras para cortinas, assentos de cortadores de grama, e moirões para cerca (ENGLISH et al., 1996).

## **2.12. Produção de compósitos**

Compósitos de plástico/madeira têm sido intensamente estudados em períodos recentes, principalmente aqueles produzidos pela 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). Os termoplásticos reforçados com fibras celulósicas mantêm as propriedades básicas dos plásticos, como leveza, excelente moldabilidade, resistência à corrosão química e características de isolante elétrico, podendo ser usados em aplicações e maiores solicitações mecânicas. Os compósitos produzidos com esses materiais podem oferecer uma

série de benefícios, como baixo custo, produtos com melhores propriedades, facilidade de processamento e maior resistência, quando comparados aos materiais não-reforçados (KRISHNAN e NARAYAN, 1992). Entretanto, a mistura desses polímeros são sistemas onde pouca ou nenhuma adesão interfacial é desenvolvida, devido à incompatibilidade inerente entre os componentes. Assim, para se obter boa adesão interfacial entre os constituintes, torna-se necessária a aplicação de três mecanismos: modificação superficial das biofibras; uso de agentes de acoplamentos interfaciais; e modificação da estrutura do plástico (KRISHNAN e NARAYAN, 1992).

A modificação de fibras celulósicas envolve a introdução de grupos funcionais ou revestimento das fibras com aditivos que possuem grupos funcionais adequados, de forma a tornar a superfície da fibra menos hidrofílica, aumentando portanto, a probabilidade de interação com os polímeros hidrofóbicos (KRISHNAN e NARAYAN, 1992). Deste modo, a utilização de isocianatos em fibras de madeiras, por exemplo, forma com estes elementos grupos uretânicos, que lhes confere características hidrofóbicas. A grafitização de estireno em fibras de madeira pode, também, resultar em compósitos de matriz de poliestireno com propriedades mecânicas melhoradas em relação ao uso de fibras não grafitizadas. O revestimento de fibras celulósicas com polipropileno maleatado (PPMA) pode provocar a grafitização superficial onde o agente modificador de superfície fica ligado covalentemente às fibras.

Dentre os inúmeros procedimentos que tratam da modificação superficial das fibras lignocelulósicas, podem ser citados aqueles feitos por COSTA (1997), ao produzir compósitos à base de polipropileno e fibras de madeira de álamo, as quais foram tratadas com silanos ou revestidas com polipropileno com o propósito de melhorar a compatibilidade entre estas substâncias, além de promover melhor dispersão das fibras de madeira na matriz de polipropileno, onde tendem a ficar aglutinadas devido às interações do tipo ligações de hidrogênio.

O tratamento com silano foi feito em reator de vidro de 1 litro de capacidade, no interior do qual foram depositados 500 ml de solução metanólica de silanos (2, 4 e 6% p/p) contendo 2% de iniciador, o peróxido de dicumila

(DCUP) e 30 g de polpa de fibras absolutamente secas. Após três horas de refluxo, o metanol foi eliminado, e a polpa, seca em estufa a 55 °C durante 24 horas.

O revestimento das fibras com polipropileno foi feito seguindo dois critérios: no primeiro o polipropileno foi sintetizado na presença de fibras de madeira; e, no segundo, as fibras de álamo foram misturadas numa solução de polipropileno.

As reações de polimerização do polipropileno na presença de fibras foram feitas em reator de 5 litros, sob agitação, a 70 °C, durante 30 minutos, no interior do qual se fez reagir o propileno na presença de 60 g de fibras de madeira (60 mesh), empregando uma razão de co-catalisador (tri-*n*-etil de alumínio-TEA); catalisador (tetracloro de titânio-  $\text{TiCl}_3$ ) igual a 50 e pressão de propileno igual a 1 kgf/cm<sup>2</sup>. No final da reação, as fibras revestidas foram lavadas com hexano e secas em estufa a 60 °C durante 24 horas.

O revestimento das fibras em solução foi feito com polipropileno ou com polipropileno maleatado (PPMA) (2 ou 10% p/v) em presença de orto-diclorobenzeno, após inchamento do polímero com esse solvente durante 24 horas. O solvente contendo o polipropileno inchado foi aquecido até a dissolução total do polipropileno (180 °C). A essa solução ainda quente foram adicionadas e misturadas cerca de 50 g de fibras de madeira (60 mesh). A mistura resultante foi então resfriada e filtrada. A massa residual foi lavada com tolueno, iso-octano e hexano. As fibras assim revestidas foram secas em estufa a 55 °C durante 24 horas.

Segundo COSTA (1997), o revestimento de fibras de madeira com solução de polipropileno maleatado (PPMA) em orto-diclorobenzeno foi mais eficiente que o revestimento com solução de polipropileno (PP).

Após esses tratamentos, foram elaborados os compósitos, em um misturador Haake, automático (temperatura e tempo de mistura controlados por computador), que permite o acompanhamento da mistura que está sendo feita através da curva torque *versus* tempo, permitindo observar, por esse gráfico, quando o polímero fica totalmente fundido, se está ocorrendo degradação ou reticulação do material. As melhores condições para o processamento dos compósitos à base de polipropileno e fibras de madeira (10, 20 ou 30% p/p) foram:

temperatura de 180 °C, tempo de mistura de 10 minutos e velocidade do rotor na câmara de mistura de 60 rpm.

Além deste, outros trabalhos têm relatado o emprego de substâncias modificadoras das superfícies das fibras de madeira, ou o uso de agentes de ligação, na produção de compósitos termoplásticos reforçados com fibras lignocelulósicas.

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

GONZALES et al., 1992 afirmam que, embora o uso de polipropileno maleatado em compósitos termoplásticos acarrete em geral uma melhora nas suas propriedades mecânicas, é possível que esse copolímero contribua apenas para melhorar a dispersão das fibras de madeira na matriz termoplástica. Os autores verificaram que o uso de PPMA emulsificado em compósitos à base do PP e PE, atua apenas como dispersante de fibras de celulose.

A baixa maleabilidade apresentada por fibras celulósicas não tratadas dispersas em matriz de polipropileno pode ser explicada pela grande diferença de energia superficial (tensão superficial) entre a matriz e as fibras. O tratamento dessas fibras com PPMA tende a abaixar essa energia superficial a um nível próximo ao da matriz melhorando a adesão interfacial (FELIX e GATENHOLM, 1991).

KOKTA et al. (1986) produziram compósitos de polietileno reforçados com fibras CTMP de aspen, grafitadas com polietileno maleatado, farinha de madeira, mica e fibras de vidro. Após submetidas à imersão em água quente ou a temperaturas de -40 °C, por sete dias, as propriedades mecânicas foram avaliadas. Os compósitos com fibras de aspen grafitadas mostraram melhores resultados quando comparados aqueles produzidos com farinha de madeira, mica

ou fibra de vidro como carga de reforço. Finalmente, a estabilidade dimensional dos compósitos à base de fibras CTMP, após quatro horas de imersão em água fervente foi a menos afetada.

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

TAKASE e SHIRAIISHI (1989) estudaram as melhores condições de processamento (temperatura, velocidade de rotação e tempo de mistura) para a produção de compósitos de polipropileno e polpa de madeira moída, empregando como agentes compatibilizadores os polipropilenos modificados com anidrido maleico, metacrilato de 2-hidroxietila e metacrilato de glicidila, concluindo que a adição de 2,5% de PPMA promove uma melhora significativa nas propriedades mecânicas do material. Os compósitos de polipropileno com fibras de madeira modificadas foram preparados em velocidades variando de 30 a 90 rpm, tempo de mistura entre 5 e 20 min., e temperaturas variando de 170 a 200 °C. Foi verificado que a 170 °C a alta viscosidade do polímero fundido, impedia a boa dispersão do material lenhoso. Temperaturas superiores a 180 °C, por outro lado, causavam a degradação da carga de reforço, havendo com isso uma redução nas propriedades de resistência dos compósitos. O efeito da velocidade de mistura foi estudado através da preparação de compósitos a 180 °C durante 10 minutos em uma faixa de velocidade que variou de 30 a 90 rpm. Velocidades elevadas, se por um lado melhoram a dispersão das fibras na matriz de polipropileno, causam também sua fragmentação, acarretando uma redução nas propriedades mecânicas. Foi observado que os compósitos de melhor qualidade foram aqueles produzidos a 50 rpm, 180 °C e tempo de mistura igual a 10 minutos.

MALDAS e KOKTA (1990) avaliaram a influência de diferentes níveis e tipos de polietileno (5-10%) e poli[metileno (polifenil isocianato)] (5%), nas propriedades mecânicas de compósitos à base de polietileno e fibras CTMP de aspen (15-35%), pré-tratadas. As propriedades mecânicas, incluindo a resistência

ao impacto, melhoraram quando se usou o polietileno em mistura com o isocianato.

KOKTA e MALDAS (1990) avaliaram o efeito do anidrido ftálico como agente compatibilizador em compósitos de poliestireno/madeira. Segundo os autores, as propriedades mecânicas, exceto a elongação e a resistência ao impacto, melhoram com o aumento da concentração de anidrido e com a qualidade de fibras até um determinado limite. De acordo com os mesmos autores, quando o anidrido ftálico é usado como agente compatibilizador, o grupo anidrido reage quimicamente com os grupos OH da celulose ou da lignina para formar ligações éster durante prensagem e aquecimento. Em adição, uma vez que os grupos carboxílicos ou éster são de natureza polar podem formar ligações de hidrogênio com os grupos OH. Entretanto, os elétrons  $\pi$  do anel benzênico do anidrido ftálico, bem como do poliestireno podem interagir formando ligações entre estas duas substâncias.

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

RAJ et al. (1990) modificaram fibras de álamo com poli [metileno (polifenil isocianato)], diisocianato de 2,4-tolileno de 1,6 hexametileno diisocianato (HMDI) e anidrido maleico que foram usados na produção de compósitos com matriz de PEAD e PELBD afirmaram os autores que compósitos produzidos com fibras CTPM de álamo, em matriz de PEAD geram melhores resultados do que os produzidos com uma matriz de PELBD, e que promovem melhor reforço de que mica e fibra de vidro.

RENSCH e RIEDL (1992) modificaram quimicamente as superfícies de fibras obtidas de polpação termoquimomecânica (CTMP) com diferentes anidridos e solventes. De acordo com os autores a formação de ligações do tipo éter

entre os anidridos e os grupos hidroxila presentes na celulose, hemiceluloses e lignina é uma forma de compatibilizar as fibras de madeira com as matrizes apolares dos plásticos. As propriedades dos materiais celulósicos modificados por anidridos dependem do método de modificação empregado. A temperatura de tratamento, o tempo de reação, o tipo e quantidade de catalisador têm um papel fundamental na extensão da modificação e da degradação que pode ocorrer durante o tratamento.

CARASCHI et al. (2000), preparam por injeção compósitos de polipropileno reforçado com fibras de carauá, empregando polipropileno grafitado com anidrido maléico (PPMA) como agente compatibilizador. A razão de fibras de carauá variou de 40 a 60% (peso/peso), enquanto o PPMA variou de zero a 1% (peso/peso). Segundo os autores, o PPMA melhorou a resistência à tração, entretanto não teve efeito significativo no módulo de elasticidade. Os autores concluíram ainda que os compósitos à base de fibras de carauá com polipropileno são extremamente favoráveis quando comparados a compósitos de polipropileno comerciais reforçado com materiais inorgânicos, como o talco e o gesso.

OKSMAN e CLEMONS (1998), estudaram as propriedades mecânicas e a morfologia de compósitos de polipropileno/farinha de madeira (PP/WF) com diferentes modificadores de impacto o polipropileno maleatado (PPMA) também foi estudado. Dois diferentes terpolímeros o etileno/propileno/dieno (EPDM) e o copolímero tribloco maleatado estireno-etileno/butileno-estireno (SEBS-MA) também foram usados como modificadores de impacto nos sistemas PP/WF. Afirmam os autores que todos os três elastômeros aumentaram a resistência ao impacto dos compósitos de PP/WF porém a adição do EPDM e SEBS foram os que promoveram os melhores resultados na resistência ao impacto. A adição de PPMA não afetou as propriedades de impacto e causou um efeito negativo na alongação do compósito, porém causou um efeito positivo na resistência à tração. Os modificadores de impacto provocaram um decréscimo na rigidez dos compósitos.

Uma ampla lista de trabalhos científicos tem relatado a preparação, por extrusão ou injeção, de compósitos termoplásticos reforçados com fibras de



madeira empregando agentes que promovem melhores linhas de adesão entre estas duas substâncias; em oposição, a literatura que descreve a produção desses produtos, por termoprensagem empregando adesivos termoendurecíveis é praticamente inexistente. No entanto, SONG e HWANG (1997) produziram chapas pela mistura de fibras vegetais e partículas reduzidas de borracha em várias proporções de peso (25:75, 50:50, 75:25 e 100:00), utilizando quatro níveis de adesivos de MDI (5,0, 10,0, 15,0 e 20%). Os resultados apresentados indicam que as propriedades mecânicas (MOR, MOE, e resistência interna) avaliadas aumentaram à medida que se reduz a quantidade de borracha na mistura. Entretanto, dentro de um mesmo nível de fibra/borracha, estas propriedades aumentam com o aumento do conteúdo de adesivo.

Em outro trabalho, YOUNGQUIST et al. (1992) produziram painéis empregando misturas de 90% de partículas de madeira e 10% de fibra de poliéster (90H/10PE); 90% de fibras de madeira e 10% de fibra de polipropileno (90H/10PE); 80% de fibras de madeira, 10% de fibras de poliéster e 10% de resina fenólica (80H/10PE/10PR), gerando produtos com densidades iguais a 0,4; 0,7; 1,0; e 1,2 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. As chapas avaliadas em suas propriedades físicas e mecânicas mostraram que, com poucas exceções, estas propriedades aumentam com o aumento da densidade das chapas produzidas.

YOUNGQUIST et al. (1993) produziram quatro tipos de chapas compostas com fibras virgens de hemlock (HF), fibras virgens de poliéster (VPET), fibras de madeira reciclada (DF) e fibras de poliéster reciclado (RPET), utilizando 10%, em peso de sólidos, de adesivo de fenol-formaldeído com teor de sólidos variando entre 51 e 53% e pH de aplicação entre 9,5 e 10. Os tratamentos empregados foram: HF/VEPET/PE (80%/10%/10%), HF/RPET/PR (80%/10%/10%), DF/VPET/PR (80%/10%/10%) e DF/RPET/PR (80%/10%/10%). Afir-mam os autores que as propriedades mecânicas, a absorção de água e a estabilidade dimensional são similares entre as chapas produzidas indistintamente, como materiais virgens e, ou, reciclados.

HWANG (1997) produziu dois tipos de madeira/plástico empregando quantidades variando entre 40 e 70% de fibras de madeira. Em um tratamento,

as partículas de madeira contendo 9, 6, 3 e 0% de uréia-formaldeído foram prensadas a 180 °C, com polietileno. Em um outro, a madeira foi misturada com fragmentos de plástico e extrusada a quente. De acordo com esse autor, o MOR e o inchamento em espessura e a máxima deflexão decrescem com o aumento da quantidade de madeira na mistura e com a redução no conteúdo de umidade.

CHINESE ACADEMY OF FORESTRY (1998) descreveu o balanço entre o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) em compósitos produzidos com fibras de madeira e fibras de plástico, concluindo que o tipo e a quantidade de adesivo empregado são os fatores que mais afetam este balanço.

ELLIS et al. (1993) produziram chapas empregando folhas, inteiras e fragmentadas, de catálogos de telefone, bem como lâminas e pó de polietileno obtidos de embalagens de supermercado, utilizando adesivos líquidos e em forma de pó de fenol-formaldeído (PF), líquido de uréia-formaldeído e líquido de polivenil acetato (PVA). Os painéis foram prensados a 200, 180 e 150 °C, de acordo com o tipo de adesivo aplicado. Os materiais compósitos foram testados quanto a resistência interna e inchamento. Segundo esses autores, chapas produzidas com folhas inteiras apresentaram elevadas propriedades de flexão, sendo comparáveis àquelas das chapas comerciais. Todas as chapas produzidas mostraram-se sensíveis à umidade.

GARDNER et al. (1994) avaliaram lâminas de madeira colada reforçada com fibras de poliéster, utilizando adesivos de resorcinol-formaldeído (RF), epóxi e emulsão do polímero MDI, com as amostras sendo testadas em condições secas e molhadas. Os resultados evidenciaram que todos os adesivos se mostraram eficientes em condições secas; entretanto, somente os adesivos de RF produziram resultados significativos em condições úmidas.

ROZMAN et al. (1998) empregaram lignina como agente de ligação entre partículas polares de madeira e não-polares de polipropileno na produção de chapas. Os dados obtidos mostraram que a aplicação desta substância não promoveu melhoria na adesão entre estes materiais. A ativação da superfície da madeira com NaOH melhorou a flexão e as propriedades de impacto do compósito formado.

Os termoplásticos são macromoléculas inertes, sem ligações cruzadas e, suas interações intermoleculares são muito fracas. No entanto, essas desvantagens podem ser superadas pela modificação de suas estruturas ao se introduzir grupos funcionais em suas macromoléculas através da copolimerização dos termoplásticos com monômeros polares ou através de grafitação de monômeros funcionais no esqueleto da estrutura desses plásticos. Outra forma de melhorar as propriedades mecânicas das resinas termoplásticas é pela introdução de cargas na matriz por elas formadas (DYACHKOVSKII, 1993).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material

As madeiras e as resinas termoplásticas, poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET), empregadas na produção das chapas de partículas foram obtidas, respectivamente, de dois povoamentos, distintos, de *Pinus elliotii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden., existentes em área do campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, e de um depósito de materiais recicláveis localizado no interior da mesma instituição. O poliestireno foi também obtido por coleta semi-seletiva de plástico pós-consumido, descartado de algumas lanchonetes, localizadas na cidade de Viçosa, como uma mistura de polímeros estirênicos na forma de copos, pratos e envases. O PET foi obtido unicamente na forma de envases de refrigerantes.

#### 3.2. Preparação das partículas

Foram previamente selecionadas e abatidas 30 árvores do gênero *Eucalyptus*, com 8 anos de idade, e nove árvores do gênero *Pinus*, com 33 anos de idade. Cada uma das árvore foi transformada em toretes de 0,80 cm, sendo estes transformados em tábuas com 2,5 cm de espessura.

Parte das tábuas obtidas foram transformadas, por cortes perpendiculares à grã da madeira, em blocos de 2,5 cm de espessura, 7 cm de largura, e comprimento correspondente à largura da tábua. Após ficarem mergulhadas em água, por cerca de cinco dias, os blocos foram transformados em flocos, com espessura média de 0,55 mm, em moinho de facas. Em seguida, os flocos foram secos ao ar durante alguns dias e depois reduzidos a partículas em moinho de martelos, equipado com peneira de 3 x 17 mm. As partículas foram selecionadas em peneira de malha com abertura de 1,0 x 1,0 mm, sendo aproveitadas as que não passaram pela respectiva malha.

As densidades das madeiras de pinus e eucalipto, determinadas de acordo com VITAL (1984), foram iguais a  $0,40 \text{ g/cm}^3$  e  $0,50 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Os plásticos poliestireno e PET, após lavados e isentos de impurezas foram transformados, ainda úmidos, em partículas utilizando moinho de martelos equipado com peneira com orifícios de 4 mm de diâmetro. As partículas obtidas foram novamente moídas no mesmo moinho equipado, então, com peneira com abertura de 1,5 x 19 mm, para redução de seu tamanho. Para a produção das partículas, as garrafas de PET foram cortadas em cinco partes, em guilhotina manual, com o propósito de facilitar a operação de moagem. Os polímeros estirênicos por seu tamanho e flexibilidade, não passaram por esta operação, sendo diretamente transformados em partículas.

As partículas de PET foram classificadas em peneira de malha com abertura de 1,0 x 1,0 mm, sendo aproveitadas as que não passaram pela respectiva malha. As partículas de poliestireno, por apresentarem a geometria desejada, não passaram por esta etapa de seleção.

As densidades do poliestireno e PET determinadas, medindo-se o volume de água deslocada por uma massa conhecida, foram iguais a 0,855 e  $1,13 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente.

### **3.3. Preparação das chapas**

Todas as chapas foram produzidas de forma a se ter densidade final igual a  $0,60 \text{ g/cm}^3$ , e espessura igual a 10 mm, sendo as frações de madeira e plástico

calculadas em função desses parâmetros. Para o cálculo da massa de madeira considerou-se um teor de umidade de 3%. Foram utilizados os adesivos de uréia-formaldeído, Cascamite PL117, e de fenol-formaldeído, Cascophen HL-2080, contendo 65 e 50,5% de sólidos resinosos, respectivamente. O catalisador endurecedor para o adesivo uréico foi o sulfato de amônia  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , em solução de 20%, na proporção de 1,5% em relação ao teor de sólidos do adesivo utilizado. A quantidade de adesivos aplicada nas chapas foi de 4 e 6% de sólidos resinosos, com base na massa da mistura empregada. A massa de partículas foi calculada para gerar duas chapas que corresponderam às duas repetições por tratamento.

As partículas de madeira e de plástico foram pesadas e colocadas no interior de um misturador tipo tambor rotatório, com 1,2 metros de diâmetro e 0,5 metros de largura, que girava a uma velocidade de 26 rotações por minuto. O adesivo e a solução de poliestireno em tolueno foram aplicados por meio de bico injetor, acionado por compressor de ar, durante um tempo médio de aplicação de 5 minutos. O método de aplicação consistiu em adicionar primeiro o adesivo e logo após a solução de poliestireno em tolueno.

A mistura de partículas de madeira e plástico após aspergida com os aditivos foi pesada, para cada repetição, e levada para a seção formadora do colchão. O colchão foi formado, manualmente, depositando-se, de uma só vez, a mistura de partículas sobre uma chapa de alumínio de 3,5 mm de espessura, colocada sob uma caixa de madeira sem fundo, com dimensões internas de 400 x 400 x 160 mm, as quais foram então cuidadosamente espalhadas, de forma aleatória.

O colchão de partículas foi prensado em prensa da marca INCO com aquecimento elétrico, ajuste independente de temperatura nos pratos e controle de pressão aplicada. O ciclo de prensagem obedeceu as seguintes condições: temperatura, 185 °C; pressão, 32 kgf/cm<sup>2</sup>; tempo, 5 minutos.

O ciclo foi composto de dois patamares de pressão, ambos de 32 kgf/cm<sup>2</sup>, necessários para que a chapa atingisse a espessura final desejada. Para se obter estes patamares, o fechamento dos pratos da prensa foi executado em dois estágios; no primeiro foram gastos 10 segundos para atingir 32 kgf/cm<sup>2</sup>,

permanecendo nesta pressão por 60 segundos, quando a pressão decresceu para valores próximos a 12 kgf/cm<sup>2</sup>, em 60 segundos; neste ponto aplicou-se pressão durante 5 segundos atingindo o segundo patamar de 32 kgf/cm<sup>2</sup>, permanecendo neste estágio por 120 segundos. Passado este tempo a pressão no manômetro decresceu lentamente durante 60 segundos para valores próximos de zero quando a prensa foi aberta totalizando 300 segundos. A Figura 13 ilustra o ciclo de prensagem praticado para a fabricação das chapas à base de madeira/plástico.

O tempo de prensagem utilizado foi aquele usado em painéis comerciais de madeira aglomerada, sendo calculado, segundo recomendação da Alba Química, que sugere que se considera de 7 a 8 segundos por milímetro de chapa, quando estes produtos são elaborados em temperaturas variando entre 180 e 190 °C. Para controlar a espessura da chapa em 10 milímetros, evitando assim, uma possível interferência da densidade do painel, nas propriedades avaliadas foi instalado um indicador no prato superior, que se deslocava sobre uma escala, graduada em 10 milímetros disposta lateralmente aos pratos da prensa.

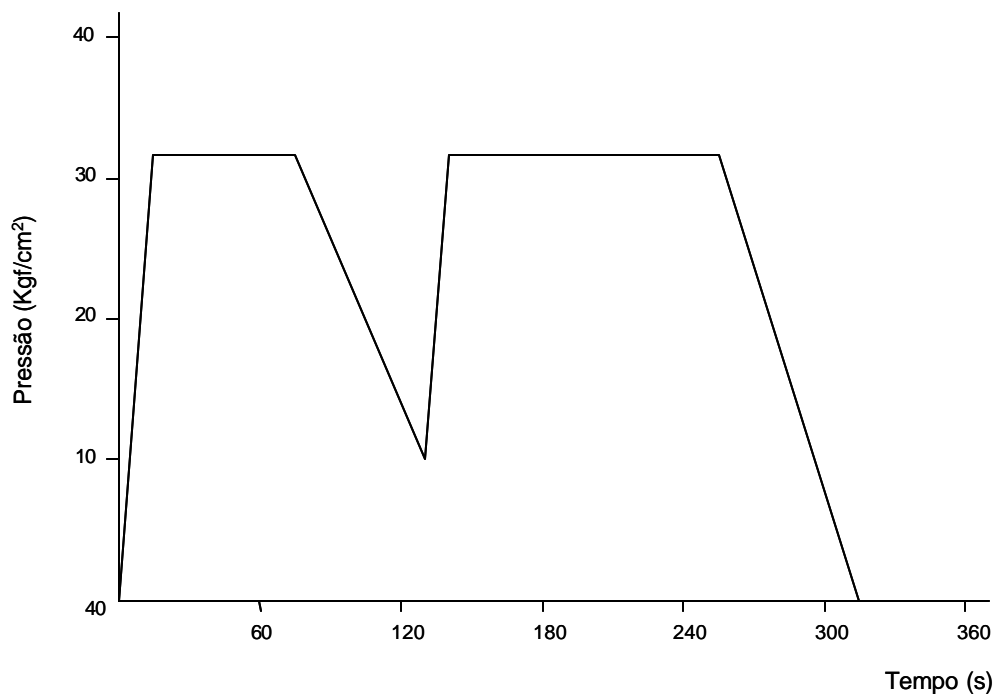


Figura 13 – Ciclo de prensagem aplicado na produção de chapas de madeira/plástico.

As chapas de aproximadamente 400 x 400 x 10 mm em camada única foram mantidas no interior de caixas à temperatura ambiente, por cerca de 10 dias, e, em seguida, tiveram suas bordas aparadas para 380 x 380 mm, e suas superfícies lixadas. De cada chapa foram retirados dois corpos-de-prova, para execução dos ensaios de flexão estática (módulo de ruptura - MOR e módulo de elasticidade - MOE); absorção de água e inchamento em espessura; e seis corpos-de-prova para a tração perpendicular à superfície da chapa. Os corpos-de-prova para determinar a densidade e o teor de umidade foram retirados de uma das extremidades dos corpos-de-prova relativos à flexão estática, perfazendo quatro corpos-de-prova por chapa. A outra extremidade foi aproveitada para o teste de arrancamento de parafuso perpendicular à superfície da chapa, perfazendo dois corpos-de-prova por chapa. As amostras foram climatizadas em ambiente de umidade relativa do ar de 65% e temperatura de 23 °C até atingirem umidade de equilíbrio. O teor de umidade foi determinado em base seca, pelo processo de secagem em estufa com ventilação de ar forçada a  $103 \pm 2$  °C, até peso constante. Os corpos-de-prova foram testados de acordo com a norma americana ASTM D 1037 (1991), em uma máquina universal de teste.

### **3.4. Delineamento experimental**

O experimento foi instalado seguindo um delineamento inteiramente casualizado, com 22 tratamentos e duas repetições. Estes tratamentos foram aplicados a duas espécies (eucalipto e pinus), utilizando-se dois tipos de adesivo (UF e PF), totalizando 160 chapas, visto que para cada espécie de madeira foram produzidas seis chapas sem adesivo. Os resultados dos testes das variáveis foram submetidos à análise de variância (ANOVA), para comparação entre os tratamentos, a 1 e 5% de probabilidade.

Os tratamentos foram comparados por meio do teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. A comparação das espécies e dos tipos de adesivos, dentro de cada tratamento, foi feita por meio do teste t de Student, a 5% de probabilidade.

A seguir estão listadas as combinações empregadas para confecção das chapas de partículas de madeira/plástico:



T<sub>1</sub> - 0% PS / 100% madeira / 4% adesivo  
T<sub>2</sub> - 0% PS / 100% madeira / 6% adesivo  
T<sub>3</sub> - 25% PS / 75% madeira / 0% adesivo / 6% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>4</sub> - 25% PS / 75% madeira / 4% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>5</sub> - 25% PS / 75% madeira / 6% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>6</sub> - 50% PS / 50% madeira / 0% adesivo / 6% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>7</sub> - 50% PS / 50% madeira / 4% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>8</sub> - 50% PS / 50% madeira / 6% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>9</sub> - 25% PS / 75% madeira / 4% adesivo  
T<sub>10</sub> - 25% PS / 75% madeira / 6% adesivo  
T<sub>11</sub> - 50% PS / 50% madeira / 4% adesivo  
T<sub>12</sub> - 50% PS / 50% de madeira / 6% adesivo  
T<sub>13</sub> - 5/20 (PET/PS) / 75% madeira / 0% adesivo / 6% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>14</sub> - 5/20 (PET/PS) / 75% madeira / 4% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>15</sub> - 5/20 (PET/PS) / 75% madeira / 6% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>16</sub> - 10/40 (PET/PS) / 50% madeira / 0% adesivo / 6% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>17</sub> - 10/40 (PET/PS) / 50% madeira / 4% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>18</sub> - 10/40 (PET/PS) / 50% madeira / 6% adesivo / 4% solução de polistireno em tolueno  
T<sub>19</sub> - 5/20 (PET/PS) / 75% madeira / 4% adesivo  
T<sub>20</sub> - 5/20 (PET/PS) / 75% madeira / 6% adesivo  
T<sub>21</sub> - 10/40 (PET/PS) / 50% madeira / 4% adesivo  
T<sub>22</sub> - 10/40 (PET/PS) / 50% madeira / 6% adesivo

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Densidade**

Os valores médios das densidades determinadas nas chapas de madeira/plástico estão listados no Quadro 5. Pode-se observar neste quadro que ocorreram apenas três diferenças estatísticas. O valor numérico das densidades variou entre 0,60 e 0,65 g/cm<sup>3</sup> sendo que o maior coeficiente de variação foi igual a 2,61%. Portanto, apesar das diferenças estatísticas, pode-se concluir que as chapas, no que se refere às densidades, foram homogêneas, não se devendo esperar diferenças significativas nas propriedades em função da densidade.

### **4.2. Tração perpendicular**

Os resultados dos valores médios de resistência à tração perpendicular avaliadas nas chapas de madeira/plástico, considerando o efeito das espécies e do tipo de adesivo nesta propriedade, são mostradas no Quadro 6.

Nos ensaios de resistência à tração perpendicular, a norma ANSI/A 208.1-93, estabelece que as chapas de partículas de baixa densidade devem ter valor mínimo de resistência igual a 0,15 Mpa. Nos ensaios efetuados nas chapas produzidas pela mistura de madeira/plástico, com exceção de um único tratamento, todas as outras superaram em maior ou menor intensidade o valor mínimo determinado.

Quadro 5 - Valores médios de densidade( g/cm<sup>3</sup>) em chapas de madeira/plástico, em função das espécies de madeira e dos tipos de adesivos utilizados

Tipo de Plástico	Tratamento	Nível de Plástico	Nível de Adesivo	Nível de Solução de Poliestireno no Tolueno	UF		PF		
					Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus	
PS	1	0	4	0	0,61 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,62 Aa	
	2	0	6	0	0,62 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	
	4	25	4	4	0,63 Aa	0,62 Aa	0,63 Aa	0,62 Aa	
	5	25	6	4	0,64 Aa	0,62 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	
	7	50	4	4	0,64 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	
	8	50	6	4	0,64 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	
	9	25	4	0	0,60 Ab	0,61 Aa	0,62 Aa	0,62 Aa	
	10	25	6	0	0,63 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,62 Aa	
	11	50	4	0	0,63 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	
	12	50	6	0	0,63 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	
	PET/PS	14	5/20	4	4	0,63 Aa	0,62 Aa	0,63 Aa	0,65 Aa
		15	5/20	6	4	0,63 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	0,64 Aa
17		10/40	4	4	0,63 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	0,64 Aa	
18		10/40	6	4	0,64 Aa	0,64 Aa	0,62 Ab	0,63 Aa	
19		5/20	4	0	0,61 Ab	0,61 Aa	0,65 Aa	0,63 Aa	
20		5/20	6	0	0,62 Aa	0,61 Aa	0,64 Aa	0,63 Aa	
21		10/40	4	0	0,63 Aa	0,62 Aa	0,64 Aa	0,64 Aa	
22		10/40	6	0	0,64 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	
<b>Sem Adesivos</b>									
PS		3	25	0	6	.	.	0,60 A	0,60 A
	6	50	0	6	.	.	0,64 A	0,64 A	

PET/PS	13	5/20	0	6	.	.	0,60 A	0,61 A
	16	10/40	0	6	.	.	0,65 A	0,64 A
CV (%)					1,33	1,44	1,43	2,61

Em cada tratamento e cada adesivo, letras maiúsculas comparam espécies pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

Em cada tratamento e cada espécie, letras minúsculas comparam adesivos pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

Quadro 6 - Valores médios de resistência à tração perpendicular (MPa) em função das espécies e dos tipos de adesivo utilizados

Tipo de Plástico	Tratamento	Nível de Plástico	Nível de Adesivo	Nível de Solução de Poliestireno no Tolueno	UF		PF		
					Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus	
PS	1	0	4	0	0,30 Aa	0,27 Ab	0,33 Aa	0,36 Aa	
	2	0	6	0	0,57 Aa	0,46 Ba	0,52 Aa	0,46 Aa	
	4	25	4	4	0,37 Aa	0,40 Aa	0,41 Aa	0,36 Aa	
	5	25	6	4	0,66 Ab	0,70 Aa	0,75 Aa	0,66 Ba	
	7	50	4	4	0,48 Ba	0,60 Aa	0,44 Aa	0,37 Ab	
	8	50	6	4	0,52 Bb	0,76 Aa	0,60 Aa	0,47 Bb	
	9	25	4	0	0,22 Bb	0,34 Aa	0,33 Aa	0,29 Aa	
	10	25	6	0	0,45 Ab	0,51 Aa	0,55 Aa	0,43 Bb	
	11	50	4	0	0,40 Aa	0,28 Ba	0,31 Ab	0,28 Aa	
	12	50	6	0	0,44 Aa	0,47 Aa	0,41 Aa	0,38 Ab	
	PET/PS	14	5/20	4	4	0,51 Aa	0,33 Ba	0,38 Ab	0,36 Aa
		15	5/20	6	4	0,67 Aa	0,70 Aa	0,61 Ba	0,73 Aa
17		10/40	4	4	0,31 Aa	0,39 Ab	0,40 Ba	0,45 Aa	
18		10/40	6	4	0,58 Aa	0,51 Aa	0,57 Aa	0,56 Aa	

	19	5/20	4	0	0,34 Aa	0,29 Aa	0,29 Aa	0,30 Aa
	20	5/20	6	0	0,49 Ab	0,48 Aa	0,58 Aa	0,47 Ba
	21	10/40	4	0	0,22 Ab	0,27 Aa	0,35 Aa	0,25 Ba
	22	10/40	6	0	0,29 Ab	0,36 Aa	0,43 Aa	0,31 Ba
<b>Sem Adesivos</b>								
PS	3	25	0	6	.	.	0,12 A	0,17 A
	6	50	0	6	.	.	0,22 B	0,31 A
PET/P	13	5/20	0	6	.	.	0,12 A	0,07 A
S	16	10/40	0	6	.	.	0,17 A	0,10 B
CV (%)					10,32	11,13	12,08	9,18

Em cada tratamento e cada adesivo, letras maiúsculas comparam espécies pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

Em cada tratamento e cada espécie, letras minúsculas comparam adesivos pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

Os resultados evidenciam que a espécie de pinus, dentro do adesivo de fenol-formaldeído, foi a que mais influenciou a resistência à tração perpendicular. Quanto ao tipo de adesivo seu efeito sobre os tratamentos foi praticamente da mesma ordem de grandeza independente da espécie de madeira utilizada.

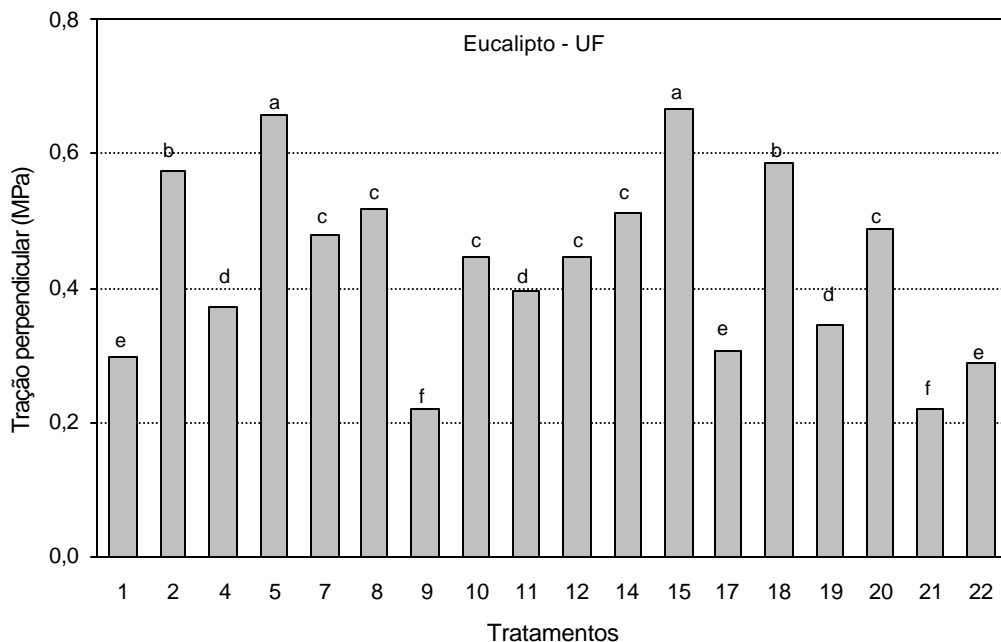
Pela relativa magnitude de significância estatística, acredita-se que as variações existentes sejam mais produto de uma possível variabilidade existente nas seis amostras, que geraram os valores médios de resistência, de que propriamente ao efeito das espécies e tipo de adesivos empregados.

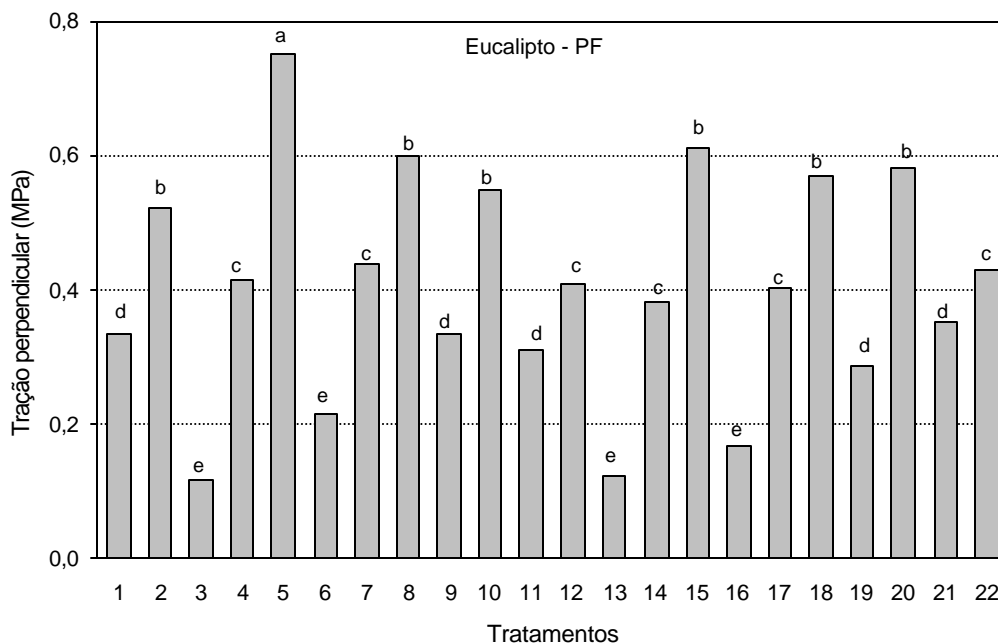
As Figuras 16 e 17 apresentam os valores médios da tração perpendicular à superfície do plano em função das variáveis do processo: níveis de adesivo, solução de poliestireno em tolueno e tipos e níveis de plástico.

Observa-se em todas as figuras apresentadas que a resistência à tração perpendicular, foi influenciada positivamente pela maior quantidade de adesivo empregada. Assim, as chapas produzidas com 6% de adesivo apresentaram, de modo geral, valores de resistência superiores aqueles determinados nas chapas

com 4% de adesivo. Estes resultados eram esperados e são compatíveis com aqueles observados na literatura para as chapas de partículas convencionais.

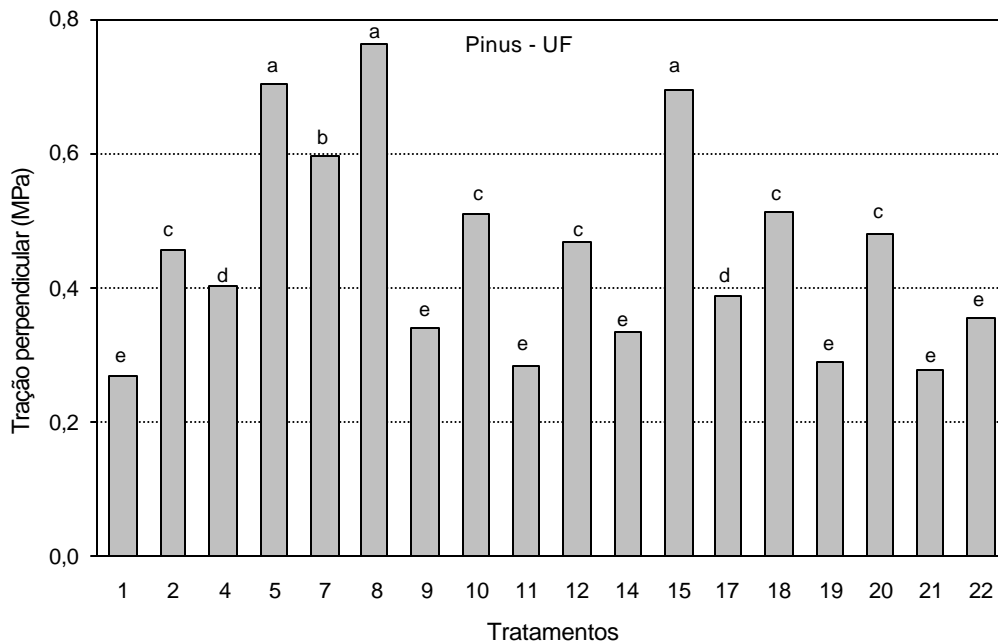
A outra variável com efeito significativo na resistência à tração perpendicular foi à solução de poliestireno em tolueno. Seu efeito nos painéis onde foi empregada pode ser percebido quando se comparam os valores médios determinados com os correspondentes avaliadas nas chapas sem a sua presença. De acordo com os valores médios apresentados, as chapas produzidas com solução de poliestireno em tolueno foram, geralmente, mais resistentes à tração perpendicular. A maior resistência apresentada pelas chapas com solução de poliestireno em tolueno pode ser explicada pela ação de solvência desta substância sobre as partículas de poliestireno, somada ao efeito positivo da pressão e temperatura empregados no processo de produção. Acredita-se que o tolueno tenha dissolvido parcialmente as superfícies do poliestireno, levando a uma adesão mais efetiva entre estas partículas, possivelmente pelo fenômeno da interdifusão molecular, favorecida pelo contato íntimo entre estas unidades

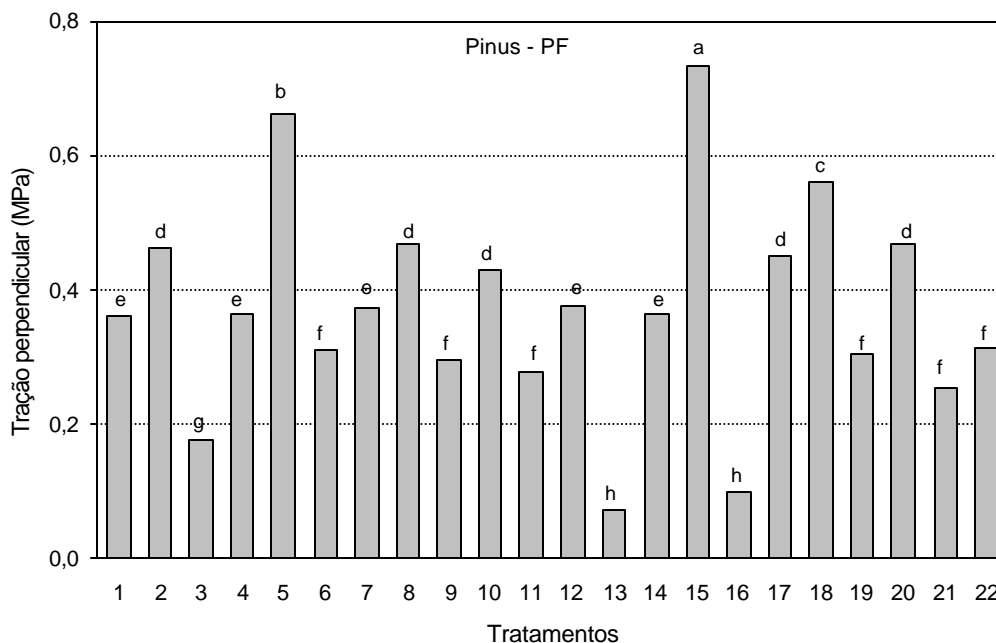




Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 16 - Efeito dos tratamentos na resistência à tração perpendicular das chapas produzidas com partículas de eucalipto/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).





Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 17 - Efeito dos tratamentos na resistência à tração perpendicular das chapas produzidas com partículas de pinus/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).

devido à pressão aplicada no momento da prensagem. A compactação do colchão favoreceu ainda o contato entre as partículas de poliestireno e madeira, entretanto devido à incompatibilidade inerente entre estes materiais, é gerado na interface entre suas superfícies regiões de elevada tensão superficial, que pode ter sido reduzida pelo efeito da alta temperatura empregada no ciclo de prensagem. Deste modo, como a temperatura empregada foi superior à temperatura de transição vítrea do poliestireno ( $T_g=100^\circ\text{C}$ ) e as partículas de plástico, já parcialmente desorganizadas pela ação do tolueno, tornaram-se ainda mais flexíveis, pela desorganização de suas regiões amorfas, nas quais pode ter ocorrido clivagens aleatórias gerando com isso radicais livres. Estes radicais podem ter interagido com alguns sítios reativos disponíveis no adesivo termofixo, distribuído em suas superfícies, e este ao formar ligações entrecruzadas com o adesivo presente nas superfícies da madeira durante o processo de cura. Isto pode ter resultado em



adesões mais resistentes entre as partículas de plástico e madeira que refletiu numa melhor resistência à tração perpendicular.

Os valores médios apresentados indicam que a tração perpendicular ao plano da chapa foi mais elevada nos produtos elaborados com níveis mais reduzidos de plástico, 6% de adesivo, e, solução de poliestireno em tolueno, independente da mistura utilizada, sendo os valores determinados nestas chapas superiores aos das chapas sem plástico.

As chapas produzidas sem adesivo apresentaram valores de resistência significativamente menores do que os obtidos nas chapas produzidas com 4% de adesivo, porém, mesmo assim atenderam em quase totalidade os valores mínimos requeridos para a sua comercialização. Estes resultados são compatíveis com aqueles encontrados por YOUNGQUIST et al. (1992) que, ao produzirem chapas pela mistura de 80% de partículas de madeira, 10% de poliéster e 10% de resina de fenol-formaldeído, determinaram para a ligação interna valores iguais a 0,31 Mpa. Para chapas produzidas, nas mesmas condições com 90% de partículas de madeira e 10% de polipropileno este valor foi reduzido para 0,12 Mpa.

#### **4.3. Resistência à flexão estática**

A resistência à flexão estática representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra sujeita ao dobramento. O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) são os dois parâmetros normalmente determinados nos ensaios em flexão estática. Tais valores são de grande importância, pois oferecem uma boa aproximação da resistência do material, constituindo-se na prática, um parâmetro de grande aplicação na classificação de materiais.

A norma de comercialização de chapas de partículas de baixa densidade ANSI 208.1-93, admite como valores mínimos requeridos para MOR e MOE, 0,5 MPa e 1,025 GPa, respectivamente.

### 4.3.1. Módulo de ruptura

Os valores médios dos ensaios em flexão para o módulo de ruptura determinados nas chapas de madeira/plástico são representados no Quadro 7, em função das espécies de madeira e do tipo de adesivo utilizado.

Os resultados apresentados indicam que não houve influência, com umas poucas exceções, das espécies de madeira e dos tipos de adesivos na propriedade do módulo de ruptura avaliado nas chapas de madeira/plástico. Porém, as chapas produzidas com madeira de eucalipto apresentaram a tendência de serem mais resistentes em flexão estática do que aquelas produzidas com madeira de pinus. Isto provavelmente esteja relacionado com a maior compactação do colchão no momento da prensagem, devido ao maior volume de partículas de madeira de eucalipto em cada mistura utilizada.

Os valores médios de resistência em flexão para o módulo de ruptura estão representados nos gráficos das Figuras 18 e 19, em função das variáveis do processo: níveis de adesivo, níveis da solução de poliestireno em tolueno e níveis de plástico.

Quanto ao módulo de ruptura, todos os valores médios apresentados indicam que houve um efeito positivo nesta propriedade com o aumento do nível de adesivo, embora esta qualidade nem sempre tenha sido evidente em níveis

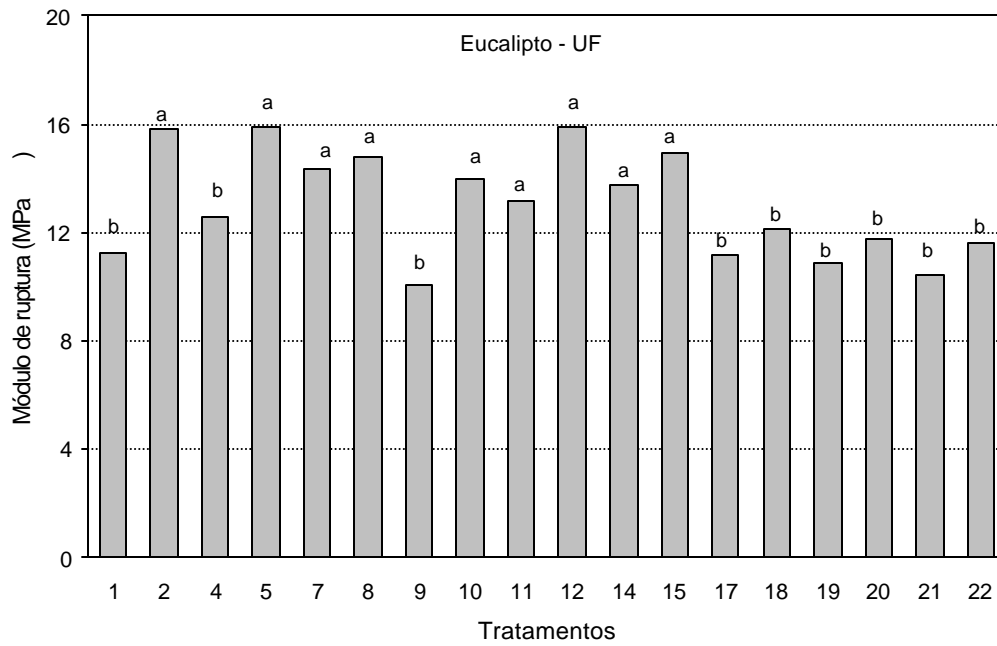
Quadro 7 - Valores médios do módulo de ruptura(Mpa) em chapas de madeira/plástico, considerando as espécies de madeira e os tipos de adesivos empregados

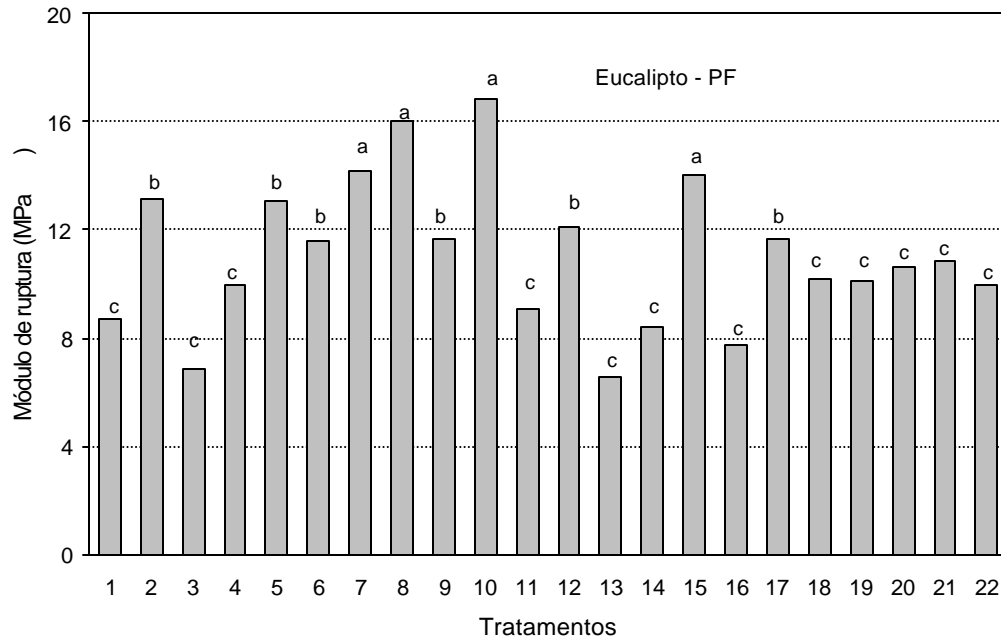
Tipo de Plástico	Tratamento	Nível de Plástico	Nível de Adesivo	Nível de Solução de Poliestireno em Tolueno	UF		PF		
					Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus	
PS	1	0	4	0	11,21 Aa	8,66 Ab	8,69 Aa	9,47 Aa	
	2	0	6	0	15,81 Aa	11,48 Aa	13,14 Aa	11,70 Aa	
	4	25	4	4	12,61 Aa	11,57 Aa	9,95 Aa	9,55 Aa	
	5	25	6	4	15,86 Aa	12,05 Ba	13,06 Ab	14,32 Aa	
	7	50	4	4	14,34 Aa	13,94 Aa	14,22 Aa	12,97 Aa	
	8	50	6	4	14,76 Aa	16,07 Aa	16,00 Aa	17,41 Aa	
	9	25	4	0	10,04 Aa	11,17 Aa	11,67 Aa	10,66 Aa	
	10	25	6	0	14,01 Aa	12,07 Aa	16,88 Aa	12,06 Aa	
	11	50	4	0	13,20 Aa	11,90 Aa	9,11 Aa	10,52 Aa	
	12	50	6	0	15,87 Aa	11,34 Aa	12,12 Aa	12,22 Aa	
	PET/PS	14	5/20	4	4	13,79 Aa	10,34 Aa	8,41 Ab	6,83 Aa
		15	5/20	6	4	14,95 Aa	13,53 Ba	14,07 Aa	13,00 Aa
17		10/40	4	4	11,17 Aa	11,19 Aa	11,67 Aa	8,08 Aa	
18		10/40	6	4	12,10 Aa	13,95 Aa	10,16 Aa	9,96 Aa	
19		5/20	4	0	10,90 Aa	8,27 Aa	10,13 Aa	7,28 Aa	
20		5/20	6	0	11,78 Aa	14,13 Aa	10,60 Aa	9,31 Ab	
21		10/40	4	0	10,46 Aa	6,73 Aa	10,87 Aa	7,12 Aa	
22		10/40	6	0	11,60 Aa	8,23 Aa	9,94 Aa	9,41 Aa	

Sem Adesivos								
PS	3	25	0	6	.	.	6,88 A	9,48 A
	13	5/20	0	6	.	.	6,55 A	5,28 A
PET/P S	6	50	0	6	.	.	11,60 A	11,23 A
	16	10/40	0	6	.	.	7,75 A	5,13 Aa
CV (%)					12,78	15,14	14,60	21,75

Em cada tratamento e cada adesivo, letras maiúsculas comparam espécies pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

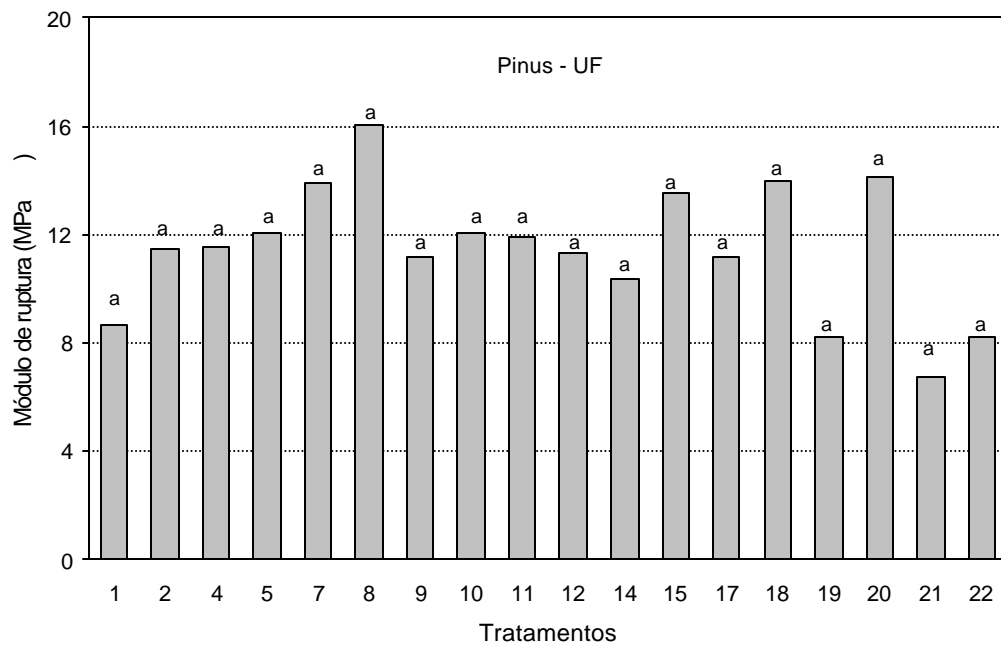
Em cada tratamento e cada espécie, letras minúsculas comparam adesivos pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

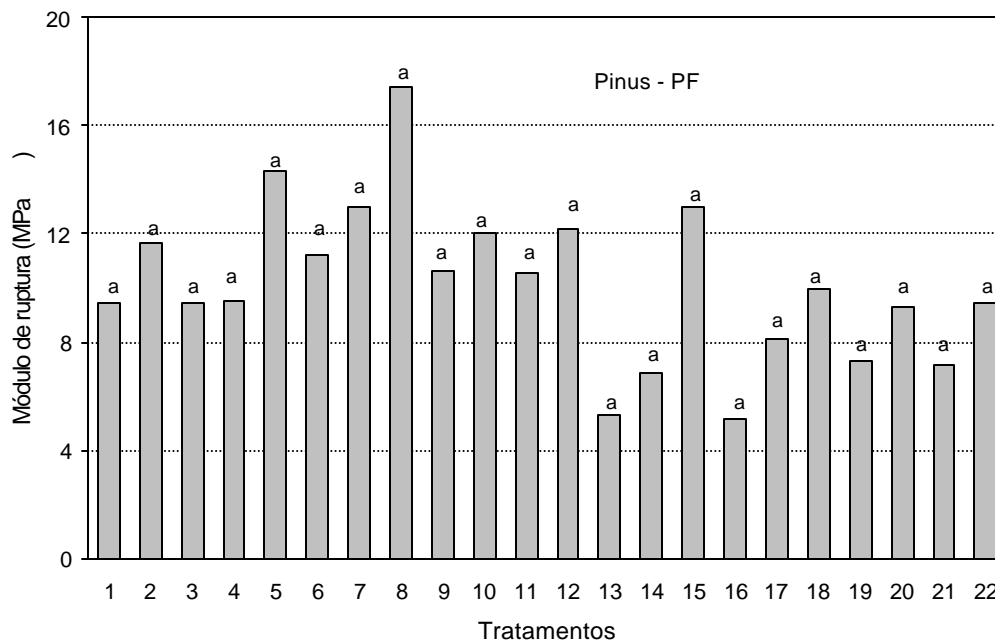




Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 18 - Efeito dos tratamentos no módulo de ruptura das chapas produzidas com partículas de eucalipto/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).





Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 19 - Efeito dos tratamentos no módulo de ruptura das chapas produzidas com partículas de pinus/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).

estatísticos pelo teste de Scott-knott. As chapas à base de madeira/plástico quando comparadas às testemunhas, dentro de um mesmo nível de adesivo, apresentaram para o módulo de ruptura valores da mesma ordem de significância, sendo que alguns tratamentos foram, numericamente, superiores e outras inferiores.

Em se tratando do efeito da solução de poliestireno em tolueno no módulo de ruptura, ao se analisar os valores médios apresentados em todas as figuras, para um mesmo nível de adesivo, conclui-se que esta substância teve ação mais efetiva nas chapas produzidas com 50% de poliestireno. Tal afirmativa pode ser confirmada ao se comparar, por exemplo, dentro da espécie eucalipto e adesivo de fenol-formaldeído, os valores médios determinados nos tratamentos 7 e 8 com tolueno e os similares 11 e 12 sem tolueno, observa-se de imediato superioridade dos primeiros sobre aqueles onde não se aplicou a solução de tolueno.

Tal comparação não pode ser estendida aos valores determinados nas chapas produzidas com eucalipto e adesivo de uréia-formaldeído, pois neste caso

o efeito não é tão intenso. Confrontando os valores médios de resistência das chapas produzidas com poliestireno e PET/PS, conclui-se que de forma geral os produtos com madeira poliestireno foram mais resistentes que os da mistura PET/PS. Assim, nas chapas produzidas com madeira de pinus e adesivo de fenol-formaldeído, os tratamentos 4 e 5, por exemplo, com 25% de poliestireno ao serem comparados aos tratamentos 14 e 15 com 5/10% de PET/PS, apresentaram valores médios de resistência superiores aos das chapas produzidas pela mistura de PET/PS. O mesmo efeito é verificado entre os tratamentos 7 e 8 com 50% de poliestireno e 17 e 18 com relação de PET/PS igual a 10/40%. Os menores valores de resistência determinados nas chapas de PET/PS, talvez esteja associado à presença do PET que, acredita-se, tenha atuado exclusivamente como carga.

As chapas produzidas sem adesivo apresentaram valores médios de resistência para o módulo de ruptura relativamente elevados quando comparados num mesmo nível de plástico, aos valores determinados nas chapas com 4% de adesivo. Isto se deve, provavelmente ao poder de adesão do poliestireno em solução de tolueno.

YOUNGQUIST et al. (1992) ao avaliarem o módulo de ruptura em flexão estática em chapas com densidade de  $0,7 \text{ g/cm}^3$ , produzidas com 80% de partículas de madeira, 10% de poliéster e 10% de resina fenólica encontraram valores de resistência igual a 21 Mpa. Para chapas produzidas com 90% de partículas de madeira e 10% de poliéster este valor foi reduzido para 9,7 MPa.

#### **4.3.2. Módulo de elasticidade**

Os valores médios do módulo de elasticidade em flexão estática determinados nas chapas de madeira/plástico estão representados no Quadro 8, considerando a influência das espécies de madeira e dos tipos de adesivos empregados.

De acordo com os dados apresentados conclui-se que o módulo de elasticidade não foi significativamente afetado pelas espécies de madeira e pelos tipos de adesivos empregados. Porém, houve uma tendência, em valores numé-

ricos, para o módulo de resistência mais elevado nas chapas produzidas com madeira de eucalipto, o que é provavelmente devido à maior compactação do colchão durante a operação de prensagem em função de uma maior massa de partículas de madeira de eucalipto presente na mistura.

Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade em flexão estática considerando as variáveis de produção: níveis de adesivo, níveis de solução de poliestireno em tolueno, e, tipos e níveis de plástico.

Os valores médios do módulo de elasticidade expressos nos gráficos apresentados sugerem que esta propriedade foi beneficiada pelo aumento do nível de adesivo utilizado. Assim, chapas produzidas com 6% de adesivo apresentaram valores médios de resistência, numericamente, superiores aos das chapas com 4% de adesivo.

Quadro 8 - Valores médios do módulo de elasticidade (GPa) em chapas de madeira/plástico, considerando as espécies de madeira e os tipos de adesivos empregados

Tipo de Plástico	Tratamento	Nível de Plástico	Nível de Adesivo	Nível de Solução de Poliestireno em Tolueno	UF		PF	
					Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus
PS	1	0	4	0	2,44 Aa	1,66 Aa	1,85 Aa	1,98 Aa
	2	0	6	0	2,97 Aa	1,97 Ba	2,30 Aa	2,35 Aa
	4	25	4	4	2,60 Aa	2,24Aa	2,32 Aa	1,87 Aa
	5	25	6	4	3,05 Aa	2,34 Aa	2,85 Aa	2,75 Aa
	7	50	4	4	2,68 Aa	2,14 Aa	2,10 Aa	2,46 Aa
	8	50	6	4	3,03 Aa	2,65 Aa	2,84 Aa	3,10 Aa



PET/P S	9	25	4	0	2,04 Aa	1,93 Aa	2,51 Aa	2,20 Aa
	10	25	6	0	2,76 Aa	2,01 Aa	2,63 Aa	2,43 Aa
	11	50	4	0	2,88 Aa	2,30 Aa	2,00 Aa	2,21 Aa
	12	50	6	0	2,89 Aa	2,69 Aa	2,47 Aa	2,66 Aa
	14	5/20	4	4	2,61Aa	2,25 Aa	1,76 Aa	1,52 Aa
	15	5/20	6	4	3,03 Aa	2,76 Aa	2,14 Aa	2,39 Aa
	17	10/40	4	4	2,19 Aa	2,24 Aa	2,02 Aa	1,98 Aa
	18	10/40	6	4	2,45 Aa	2,59 Aa	2,12 Aa	2,38 Aa
	19	5/20	4	0	2,23 Aa	1,88 Aa	1,78 Ab	1,80 Aa
	20	5/20	6	0	2,45 Aa	2,46 Aa	2,11 Aa	1,94 Aa
	21	10/40	4	0	1,96 Aa	1,60 Ba	2,13 Aa	1,78 Aa
	22	10/40	6	0	2,21 Aa	1,75 Aa	2,24 Aa	2,11 Aa
<b>Sem Adesivos</b>								
PS	3	25	0	6	.	.	1,41 A	2,00 A
	6	50	0	6	.	.	2,86 A	2,60 A
PET/P S	13	5/20	0	6	.	.	1,61 A	1,32 A
	16	10/40	0	6	.	.	1,49 A	1,35 Aa
CV (%)					13,62	13,72	15,69	15,37

Em cada tratamento e cada adesivo, letras maiúsculas comparam espécies pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

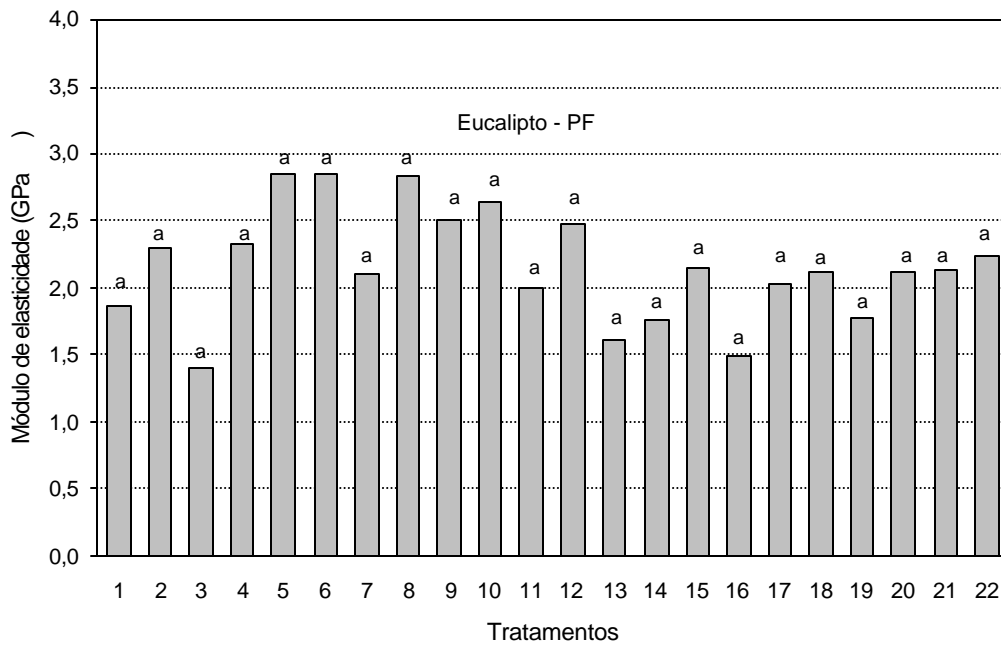
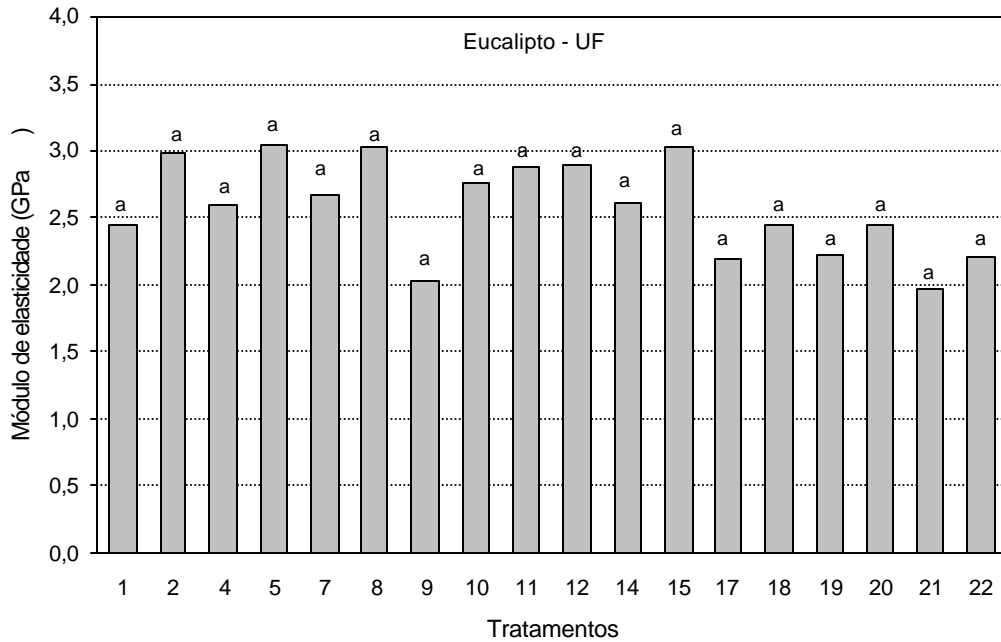
Em cada tratamento e cada espécie, letras minúsculas comparam adesivos pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

Quando comparados aos valores médios das chapas sem plástico ou testemunhas os valores de módulo de elasticidade das chapas com plástico foram na sua maioria estatisticamente idênticas pelo teste de Scott-knott, embora em valores numéricos tenham muitas vezes superado os valores determinados nas chapas testemunha. Este fato pode ser evidenciado nos produtos elaborados com madeira de eucalipto e adesivo fenólico, tomando-se, para efeito de comparação, os tratamentos 4 e 5 representativos das chapas produzidas com 25% de

poliestireno e 4 e 6% de adesivo, respectivamente e os tratamentos 1 e 2 com os mesmos níveis de adesivo. Neste caso observa-se que os valores médios de rigidez foram aproximadamente 20% superiores aos das chapas sem plástico. Tomando-se no mesmo gráfico, os tratamentos 7 e 8 é também clara a diferença numérica dos valores nas chapas com plástico.

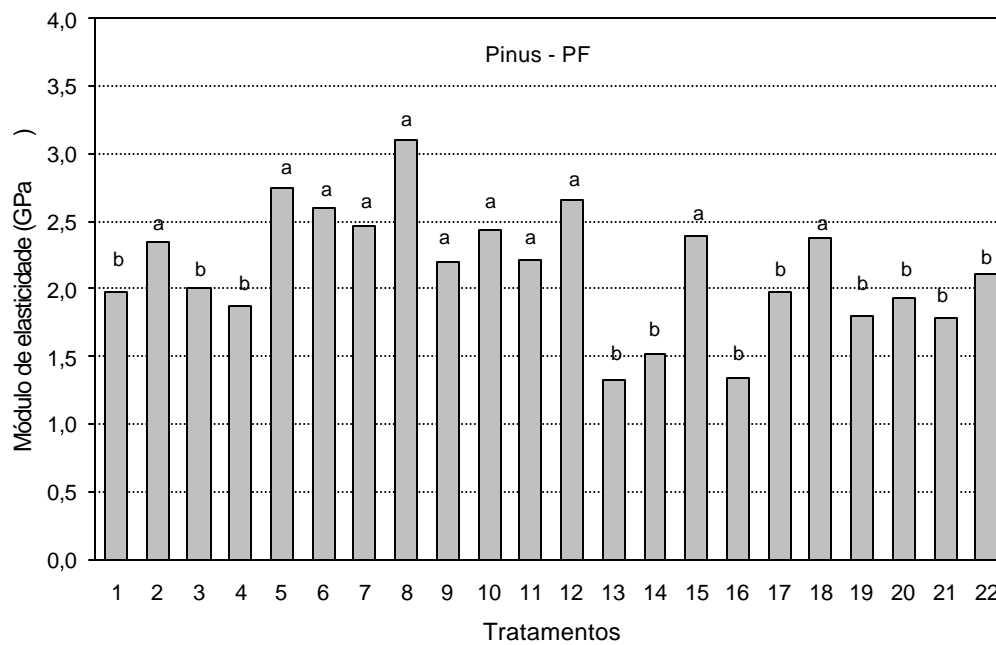
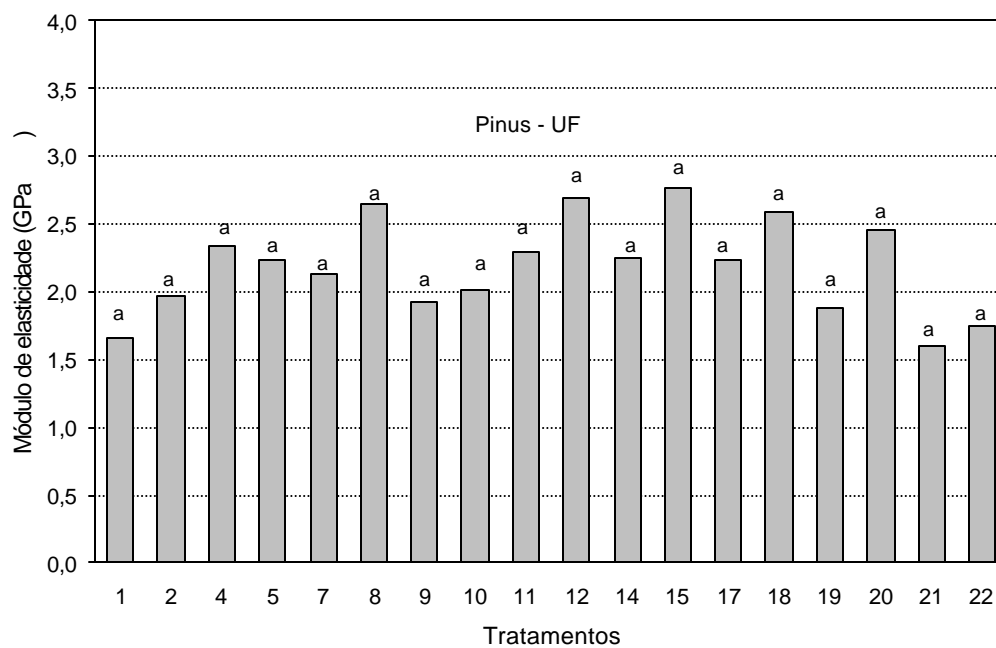
O emprego de solução de poliestireno em tolueno parece não ter influenciado nos valores do módulo de elasticidade, pois nos tratamentos onde foi aplicado os valores para esta propriedade são muito próximos dos tratamentos similares sem tolueno.

Para os tipos e níveis de plásticos utilizados, os gráficos expostos indicam que as chapas produzidas com 25 e 50% de poliestireno, excluindo aquelas à base de madeira de pinus e adesivo de uréia-formaldeído, apresentaram tendência a um módulo de elasticidade mais elevado do que as chapas com 5/20 e 10/40% de PET/PS, independente do nível de adesivo utilizado. Esta característica pode estar associada à menor proporção de PS e à presença de PET nas misturas contendo estes plásticos, porém o conteúdo de PET não parece ter influência no módulo de elasticidade. YOUNGQUIST et al. (1992) avaliando o módulo de elasticidade em flexão em chapas com densidade de  $0,7 \text{ g/cm}^3$ , produzidas pela mistura de 80% de partículas de madeira, 10% de poliéster e 10% de resina fenólica determinaram para esta propriedade valores correspondentes a 1,59 GPa. Para chapas com 90% de partículas de madeira e 10% de poliéster estes valores foram reduzidos para 1,57 GPa.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 20 - Efeito dos tratamentos no módulo de elasticidade das chapas produzidas com partículas de eucalipto/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 21 - Efeito dos tratamentos no módulo de elasticidade das chapas produzidas com partículas de pinus/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).

#### 4.4. Arrancamento de parafuso

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

Nos ensaios de arrancamento de parafusos perpendicular à superfície da chapa, a norma ANSI/A 208.1-93, exige para as chapas de partículas de baixa densidade um valor mínimo de resistência igual a 400 N. Nos ensaios efetuados nas chapas de madeira/plástico, com exceção de um único tratamento, todos os valores determinados superaram o valor mínimo exigido.

Os valores médios de resistência ao arrancamento de parafusos perpendicular à superfície estão representados no Quadro 9. Pelos valores apresentados observa-se que não houve influência da espécie de madeira e do tipo de adesivo na resistência ao arrancamento de parafusos.

Nas Figuras 22 e 23 estão representados os valores médios de resistência ao arrancamento de parafusos perpendicular à superfície das chapas, em função das variáveis do processo: níveis de adesivo, tipo e níveis de plástico e, níveis de solução de poliestireno em tolueno.

De acordo com os gráficos apresentados as variáveis que mais influenciaram na resistência ao arrancamento de parafusos foram os níveis de adesivo e níveis de solução de poliestireno em tolueno. As chapas de madeira/plástico produzidas com 6% de adesivo apresentaram sempre valores numéricos para o arrancamento, superiores aos das chapas com 4% de adesivo, embora em níveis estatísticos esta diferença nem sempre tenha sido observada pelo teste do Scott-knott, principalmente nos produtos à base de madeira de pinus e adesivo de fenol-fomaldeído.

Para um mesmo nível de adesivo, as chapas com plástico não diferiram estatisticamente das chapas sem plástico (testemunhas) quanto aos valores médios de arrancamento de parafusos, e, mesmo em valores numéricos, excluindo os tratamentos com solução de poliestireno em tolueno, foram em muitos casos inferiores a estes, acentuadamente nas chapas produzidas com madeira de pinus e adesivo de uréia-formaldeído.

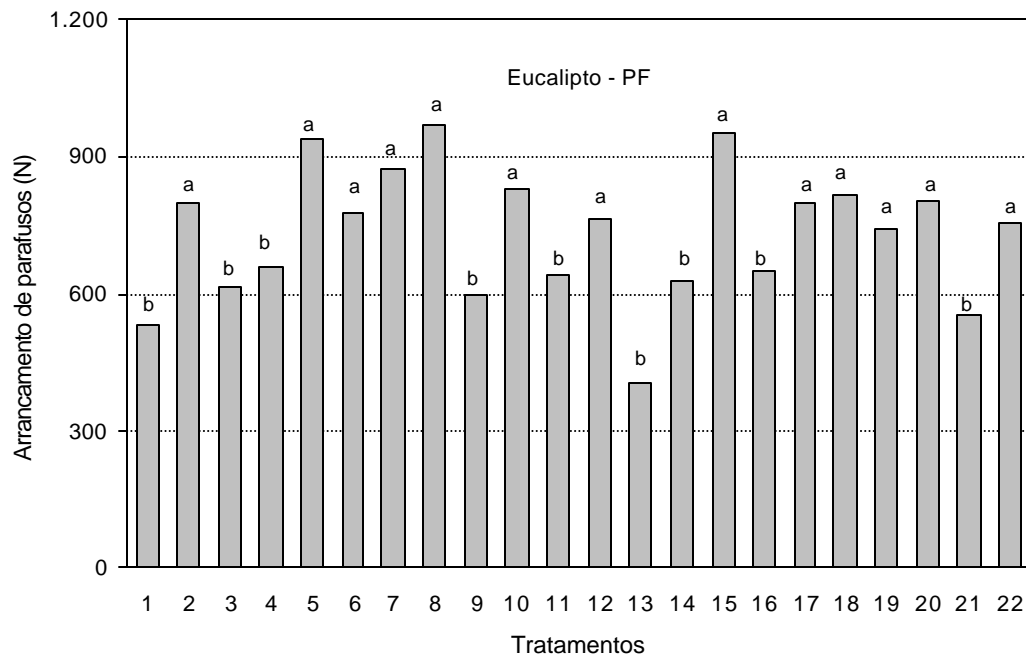
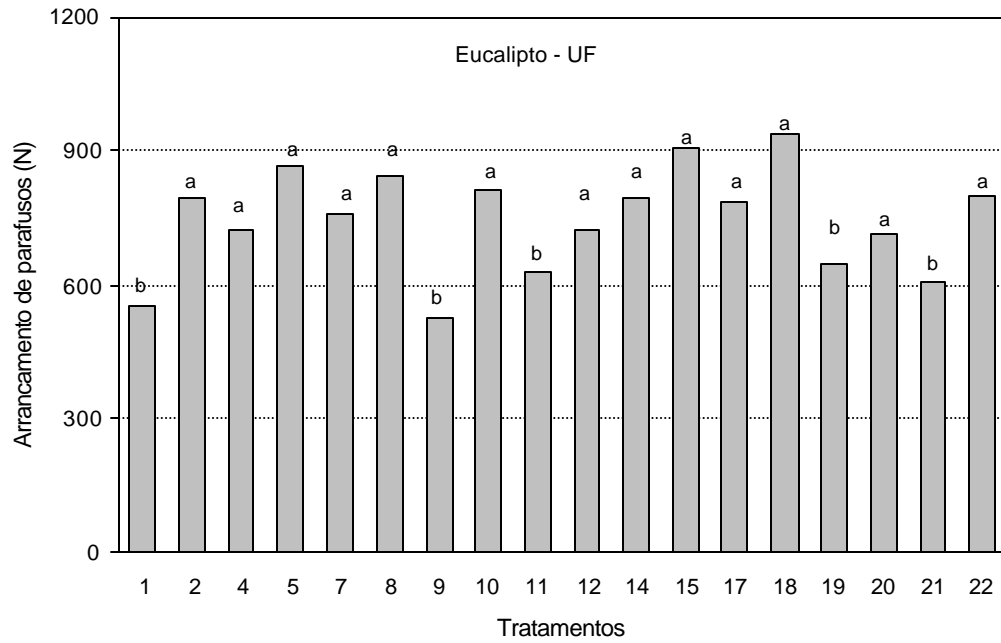
Quadro 9 - Valores médios de resistência ao arrancamento de parafusos (N) em chapas de madeira/plástico, considerando as espécies de madeira e os tipos de adesivo empregados

Tipo de Plástico	Tratamento	Nível de Plástico	Nível de Adesivo	Nível de Solução de Poliestireno em Tolueno	UF		PF		
					Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus	
PS	1	0	4	0	552,23 Aa	644,73 Aa	531,09 Aa	570,73 Aa	
	2	0	6	0	792,72 Aa	790,07 Aa	798,00 Aa	737,22 Aa	
	4	25	4	4	724,01 Aa	737,22 Aa	657,94 Aa	677,52 Aa	
	5	25	6	4	869,36 Aa	750,43 Aa	938,41 Aa	869,36 Aa	
	7	50	4	4	755,72 Aa	866,71 Aa	872,00 Aa	713,44 Aa	
	8	50	6	4	842,93 Aa	930,14 Aa	969,78 Aa	856,14 Aa	
	9	25	4	0	523,16 Aa	576,02 Aa	597,16 Aa	663,22 Aa	
	10	25	6	0	811,22 Aa	745,15 Aa	829,72 Aa	713,44 Aa	
	11	50	4	0	628,87 Aa	597,16 Aa	644,73 Aa	560,16 Aa	
	12	50	6	0	719,86 Aa	739,86 Aa	761,00 Aa	634,15 Aa	
	PET/PS	14	5/20	4	4	792,72 Aa	597,16 Ba	626,23 Aa	620,94 Aa
		15	5/20	6	4	907,85 Aa	922,21 Aa	948,64 Aa	914,28 Aa
17		10/40	4	4	787,43 Aa	758,36 Aa	800,65 Aa	694,94 Aa	
18		10/40	6	4	938,07 Aa	840,29 Aa	813,86 Aa	840,29 Aa	
19		5/20	4	0	684,37 Aa	483,52 Bb	742,51 Aa	660,58 Aa	
20		5/20	6	0	710,79 Aa	594,51 Aa	803,29 Aa	750,43 Aa	
21		10/40	4	0	605,09 Aa	599,80 Aa	554,87 Aa	586,59 Aa	
22		10/40	6	0	798,00 Aa	694,94 Aa	753,08 Aa	570,73 Ba	
<b>Sem Adesivos</b>									
PS  PET/PS		3	25	0	6	.	.	615,66 A	628,87 A
	6	50	0	6	.	.	779,50 A	708,15 A	
	13	5/20	0	6	.	.	406,88 A	377,81 A	
	16	10/40	0	6	.	.	650,01 A	630,00 A	

CV (%)	11,42	6,33	12,94	14,03
--------	-------	------	-------	-------

Em cada tratamento e cada adesivo, letras maiúsculas comparam espécies pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

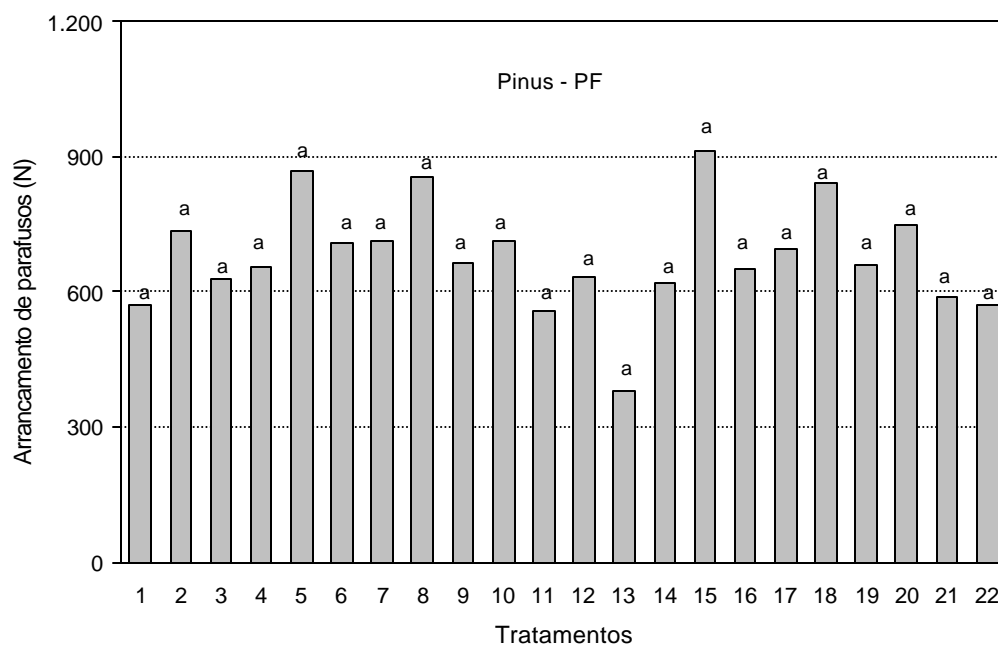
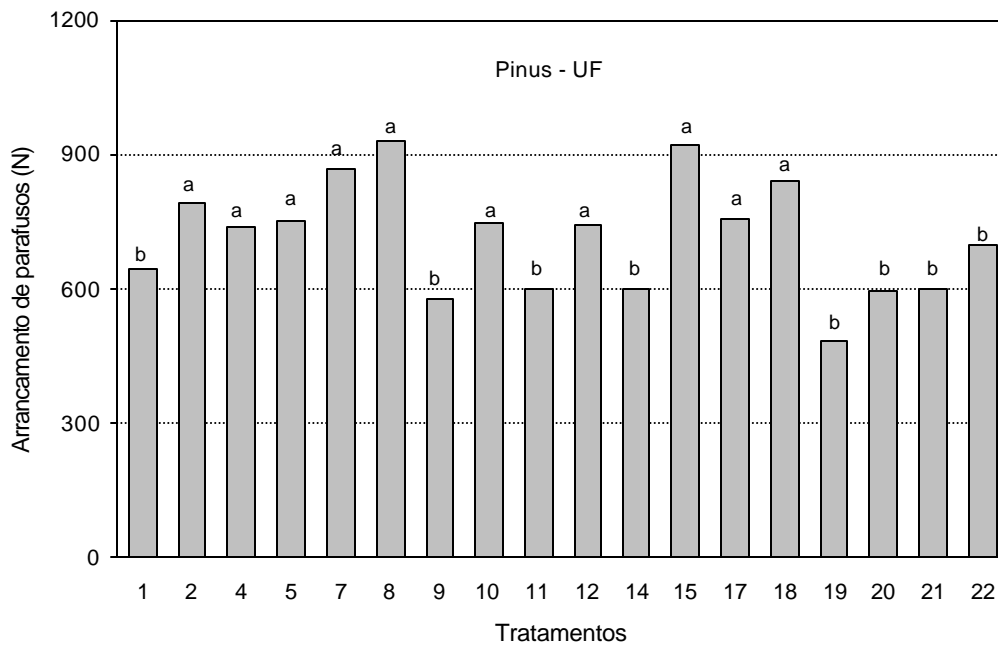
Em cada tratamento e cada espécie, letras minúsculas comparam adesivos pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 22 - Efeito dos tratamentos na resistência ao arrancamento de parafuso das chapas produzidas com partículas de eucalipto/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).





Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 23 - Efeito dos tratamentos na resistência ao arrancamento de parafuso das chapas produzidas com partículas de pinus/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).

A maior resistência ao arrancamento de parafusos, em valores numéricos, foi conseguido nas chapas onde se aplicou a solução de poliestireno em tolueno. A participação positiva desta substância, pode ser evidenciada em todos os gráficos apresentados, ao se comparar, em um mesmo nível de adesivo, os tratamentos com tolueno e seus correspondentes sem tolueno. Toma-se, por exemplo, dentro da espécie eucalipto e adesivo de uréia-formaldeído, os tratamentos 4 e 5 com 4 e 6% de adesivo, respectivamente, e os tratamentos correspondentes 9 e 10, sem tolueno. A diferença em valores percentuais, em favor dos tratamentos com solução de tolueno é de 38 e 7%, respectivamente, o que em termos de resistência são valores consideráveis. Ainda na mesma figura ao se comparar os tratamentos 17 e 18 com 10/40% PET/PS, com tolueno e os similares 21 e 22, sem tolueno a diferença em valores numéricos favoráveis aos primeiros foi de cerca de 30 e 17%, respectivamente. O suposto efeito da solução de poliestireno em tolueno, já foi exposto ao se falar em tração perpendicular. Entretanto vale acrescentar que as partículas de poliestireno ao serem parcialmente dissolvidas podem ter-se agregado, entre si, ou com as outras partículas do sistema, formando regiões mais coesas e de maior volume de massa, distribuídas em todo o corpo da chapa inclusive na zona pontual do arrancamento do parafuso, e que por apresentar a rigidez típica do poliestireno podem ter oferecido maior resistência exigindo a aplicação de maior força para o arrancamento do parafuso.

Pelos resultados de resistência ao arrancamento de parafusos obtidos nas chapas produzidas sem adesivo pode-se supor, de certa forma, que os níveis e tipos de plástico tiveram influência positiva nesta propriedade pois, em valores numéricos, nota-se que quantidades de plástico correspondentes a 50% de poliestireno e 10/40% de PET/PS, geraram resultados mais elevados de resistência quando comparados aos das chapas com menor teor de plástico. Para estes produtos observa-se ainda o efeito adesivo do poliestireno, já que os valores de resistência determinados neste tipo de chapa, com exceção do tratamento 13, superaram quase que integralmente os valores de resistência determinados nas chapas com 4% de adesivos.

## **4.5. Absorção de água e inchamento em espessura**

As chapas de partículas sofrem grandes alterações, quando expostas à umidade, destacando-se o inchamento em espessura. Os efeitos da umidade sobre as chapas alteram as suas propriedades e comprometem o seu uso em condições estruturais e em ambiente externo. Inúmeras variáveis do processo interferem no inchamento em espessura devido ao efeito da umidade: espécie, geometria das partículas, densidade da chapa, teor de resina e condições de prensagem. Segundo a maioria dos pesquisadores, o aumento no teor de adesivo reduz o inchamento em espessura e, embora a tendência não seja definida, o inchamento em espessura aumenta com o aumento da densidade da chapa. A absorção de água e inchamento em espessura dependem da umidade, tempo e temperatura de exposição.

### **4.5.1 Absorção de água**

Os valores médios de absorção de água, após 24 horas de imersão estão listados no Quadro 10.

Conforme os resultados apresentados evidencia-se a baixa influência das espécies de madeira e dos tipos de adesivos na absorção de água; entretanto houve uma tendência para uma maior absorção nas chapas produzidas com madeira de eucalipto e, particularmente naquelas coladas com adesivo fenólico. Esta tendência foi mais acentuada nas chapas sem plástico.

Nas Figuras 24 e 25, estão representados os valores médios de absorção de água, após 24 horas de imersão, em função das variáveis do processo de produção: níveis de adesivo, níveis de solução de poliestireno em tolueno e, tipos e níveis de plástico.

Todos os tratamentos contendo plásticos, independente do tipo e níveis empregados, apresentaram uma redução na absorção de água, quando comparados aos tratamentos sem plástico (testemunhas). São duas as possíveis explicações para que isso ocorresse; primeiro a presença de uma menor quantidade de partículas de madeira nas misturas com as quais se produziram as chapas;

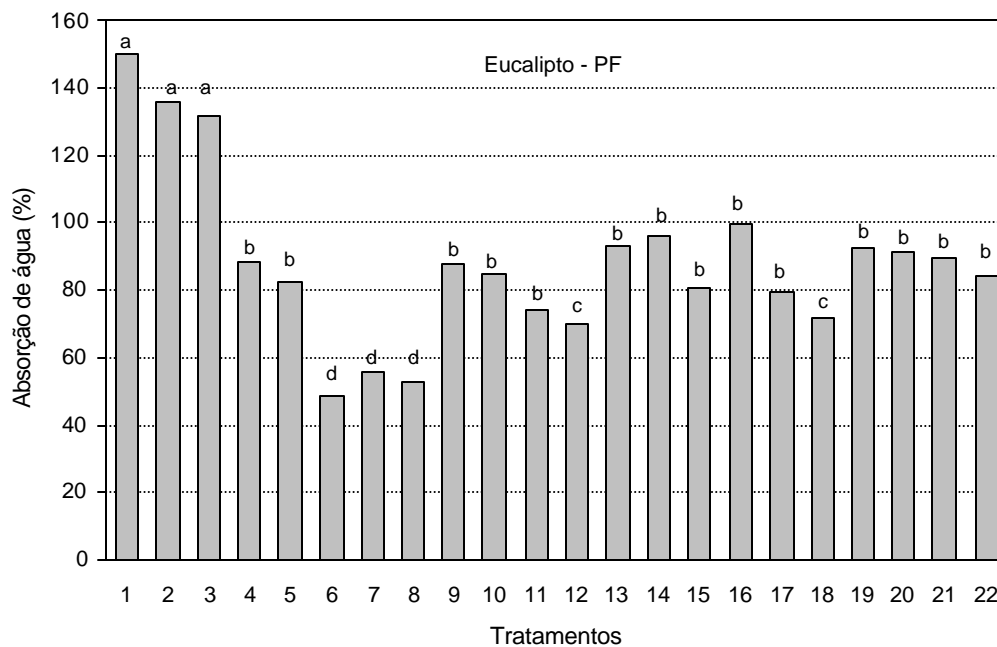
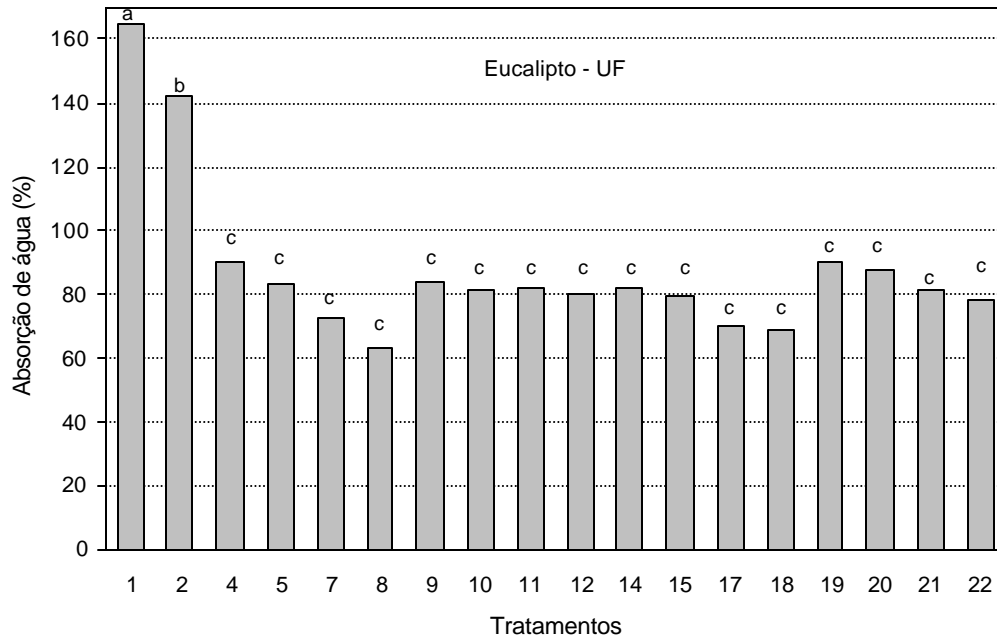
Quadro 10 - Absorção de água em chapas de madeira/plástico (%), após 24 horas de imersão, em função das espécies de madeiras e dos tipos de adesivos empregados

Tipo de Plástico	Tratamento	Nível de Plástico	Nível de Adesivo	Nível de Solução de Poliestireno em Tolueno	UF		PF		
					Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus	
PS	1	0	4	0	165,07 Aa	154,39 Aa	149,59 Ab	142,94 Ba	
	2	0	6	0	142,16 Aa	129,65 Aa	135,74 Aa	119,80 Aa	
	4	25	4	4	89,63 Aa	90,10 Aa	88,12 Aa	92,04 Aa	
	5	25	6	4	82,91 Aa	88,69 Aa	82,14 Aa	82,56 Aa	
	7	50	4	4	72,72 Aa	61,59 Aa	55,33 Aa	77,91 Aa	
	8	50	6	4	63,53 Aa	52,44 Aa	52,54 Bb	65,55 Aa	
	9	25	4	0	84,22 Aa	95,34 Aa	87,37 Aa	85,85 Aa	
	10	25	6	0	81,24 Aa	85,25 Aa	84,53 Aa	95,80 Aa	
	11	50	4	0	81,73 Aa	84,92 Aa	74,28 Aa	89,43 Aa	
	12	50	6	0	79,97 Aa	77,01 Aa	69,64 Ab	84,17 Aa	
	PET/PS	14	5/20	4	4	81,79 Aa	88,58 Aa	95,66 Aa	85,89 Aa
		15	5/20	6	4	79,28 Ab	67,03 Ba	80,50 Aa	73,26 Ba
17		10/40	4	4	70,32 Aa	83,38 Aa	79,42 Aa	81,44 Aa	
18		10/40	6	4	68,80 Aa	70,80 Aa	71,83 Aa	76,65 Aa	
19		5/20	4	0	89,98 Aa	87,60 Aa	92,27 Aa	84,53 Aa	
20		5/20	6	0	87,65 Aa	78,75 Aa	90,83 Aa	67,21 Ba	
21		10/40	4	0	81,09 Ba	101,43 Aa	89,26 Aa	86,44 Ab	
22		10/40	6	0	78,54 Aa	77,66 Aa	84,00 Aa	75,03 Aa	
<b>Sem Adesivos</b>									
PS		3	25	0	6	.	.	131,53 A	129,26 A
	6	50	0	6	.	.	48,51 A	78,41 A	
PET/PS	13	5/20	0	6	.	.	93,21 B	140,52 Aa	
	16	10/40	0	6	.	.	99,65 B	104,75 A	

CV (%)	7,46	8,65	9,28	7,85
--------	------	------	------	------

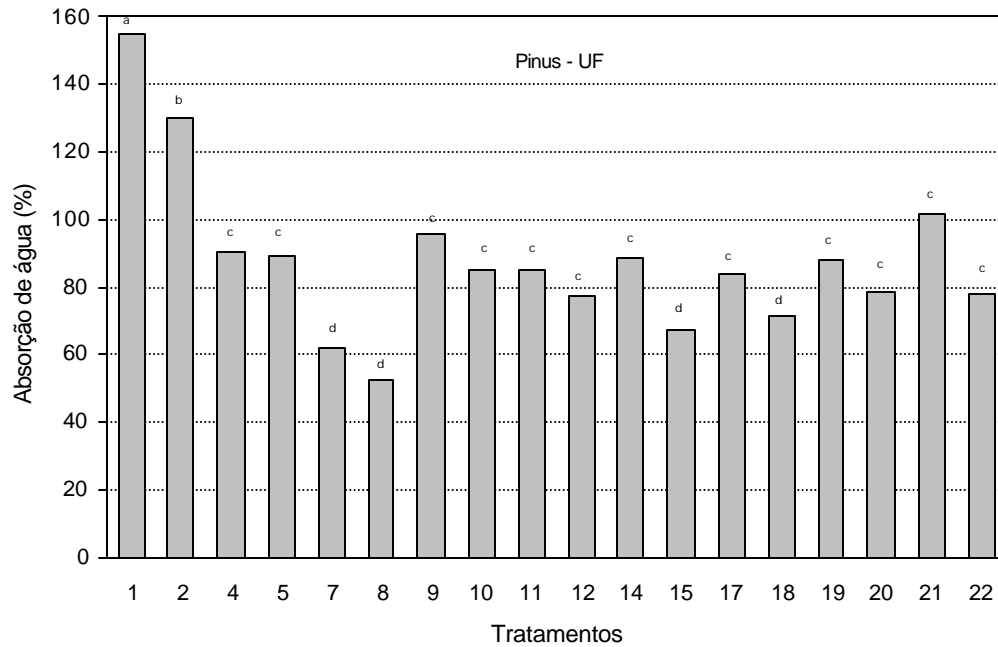
Em cada tratamento e cada adesivo, letras maiúsculas comparam espécies pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

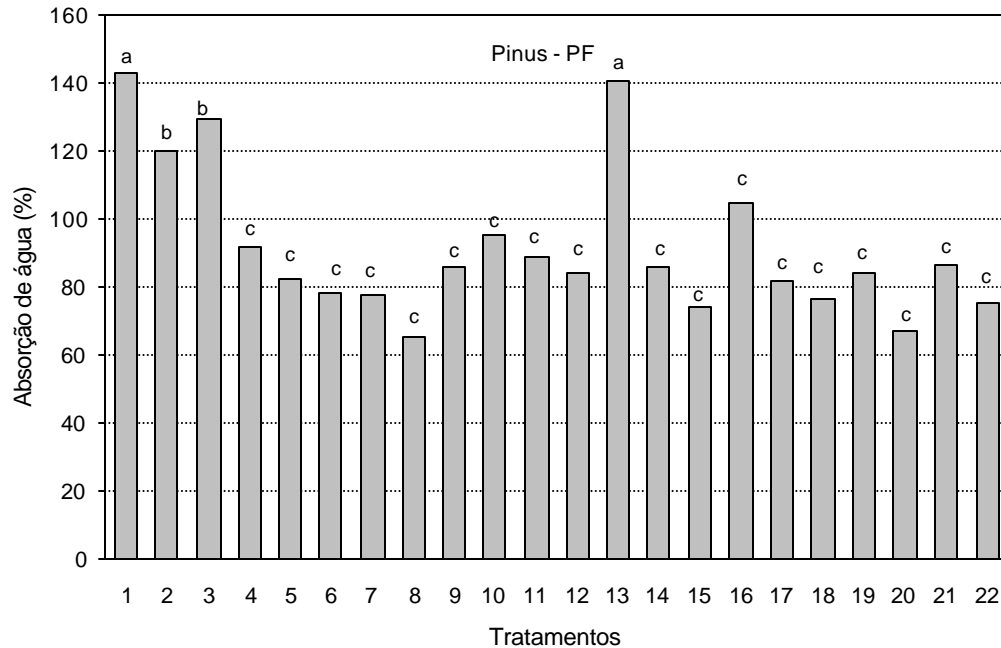
Em cada tratamento e cada espécie, letras minúsculas comparam adesivos pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 23 - Efeito dos tratamentos na absorção de água, após 24 horas de imersão das chapas produzidas com partículas de eucalipto/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).





Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 24 - Efeito dos tratamentos na absorção de água, após 24 horas de imersão das chapas produzidas com partículas de pinus/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).

segundo é o caráter altamente hidrofóbico, pela ausência de grupos polares, dos plásticos utilizados, o que levou a uma absorção nula de água por estes materiais. A absorção de água deveu-se, então, ao caráter hidrofílico da madeira. Sua riqueza em grupos polares (OH) presentes, principalmente, nas microfibrilas de celulose, faz com que este material absorva quantidades significativas de moléculas de água, que se ligam preferencialmente, aos grupos hidroxílicos disponíveis na região amorfa das microfibrilas, por meio de ligações de hidrogênio, provocando o inchamento denominado intercrystalino. Tem sido sugerido que podem ser fisicamente retidas por ligações de hidrogênio até seis camadas moleculares de água.

Entre os tratamentos com plástico, nem sempre foi evidenciada significância estatística entre os tratamentos pelo teste de Scott-knott, quanto ao efeito das variáveis de produção na absorção de água. No entanto, observa-se uma leve tendência de redução na absorção de água nos tratamentos em que as chapas

foram produzidas com 6% de adesivo, para um mesmo nível de plástico, embora em muitos casos a diferença de absorção nas chapas produzidas com 4 e 6% de adesivo seja também numericamente desprezível.

A interferência da solução de poliestireno em tolueno na absorção de água nem sempre foi evidenciada, entretanto, ao se comparar os tratamentos 7 e 8 com solução de poliestireno em tolueno, dentro da espécie eucalipto e adesivo de fenol-formaldeído, com os tratamentos correspondentes 11 e 12 sem solução de poliestireno em tolueno. Pode-se concluir que neste caso as chapas produzidas com esta substância apresentaram menor absorção de água do que aquelas sem tolueno. Porém quando se compara, no mesmo gráfico, os tratamentos 4 e 5 com tolueno com os tratamentos 9 e 10 sem tolueno, nota-se que para um mesmo nível de adesivo, os valores médios de absorção de água foram praticamente idênticos numericamente. Pelos dados apresentados em todas as figuras, acredita-se que a solução de poliestireno em tolueno possa reduzir a absorção de água em chapas produzidas com 50% de poliestireno. De fato, ao se comparar, por exemplo, os valores médios de absorção nas chapas produzidas com madeira de pinus e adesivo de uréia-formaldeído, observa-se que os valores determinados nos tratamentos 7 e 8 foram cerca de 27 e 32%, respectivamente, inferiores aos valores médios dos tratamentos 11 e 12, sem tolueno. Embora nas demais figuras não seja detectada significância estatística entre os tratamentos acima considerados, numericamente existe uma certa tendência de menor absorção de água nas chapas produzidas com solução de poliestireno em tolueno.

O efeito da solução de poliestireno em tolueno, como agente dissolvente e promovedor de adesão, pode ser visualizada nas chapas produzidas sem adesivo e com 50% ou 10/40% de poliestireno ou PET/PS. Nestes casos, é provável que devido à presença de maiores quantidades de poliestireno e solução de poliestireno em tolueno, esta substância tenha agido com maior eficácia na dissolução de poliestireno, promovendo uma certa impermeabilização das partículas de madeira.

Para chapas com densidade de  $0,7 \text{ g/cm}^3$ , produzidas pela mistura de 80% de partículas de madeira 10% de poliestireno e 10% de resina fenólica, YOUNGQUIST et al. (1992), determinaram, após 24 horas de imersão, uma ab-



sorção de água correspondentemente a 97,1%. Em chapas produzidas com 90% de partículas de madeira e 10% de poliéster este valor foi subiu para 159,9%.

#### **4.5.2 Inchamento em espessura**

Os valores médios de inchamento em espessura em função das espécies de madeira e dos tipos de adesivos utilizados estão apresentados no Quadro 11. Observa-se que as chapas não sofreram, de modo geral, a influência das espécies de madeira e dos tipos de adesivos utilizados, embora tenha havido a tendência das chapas elaboradas com madeira de eucalipto serem mais sensíveis ao inchamento em espessura do que aquelas produzidas com madeira de pinus.

Quanto ao efeito das espécies nos produtos elaborados sem adesivo, aqueles à base de madeira de eucalipto com exceção do tratamento 3, incharam menos do que aqueles produzidos com madeira de pinus, após 24 horas de imersão em água.

Nas Figuras 25 e 26, estão apresentados os valores médios de inchamento, considerando as variáveis de produção; níveis de adesivo, tipos e níveis de plástico e, níveis da solução de poliestireno em tolueno.

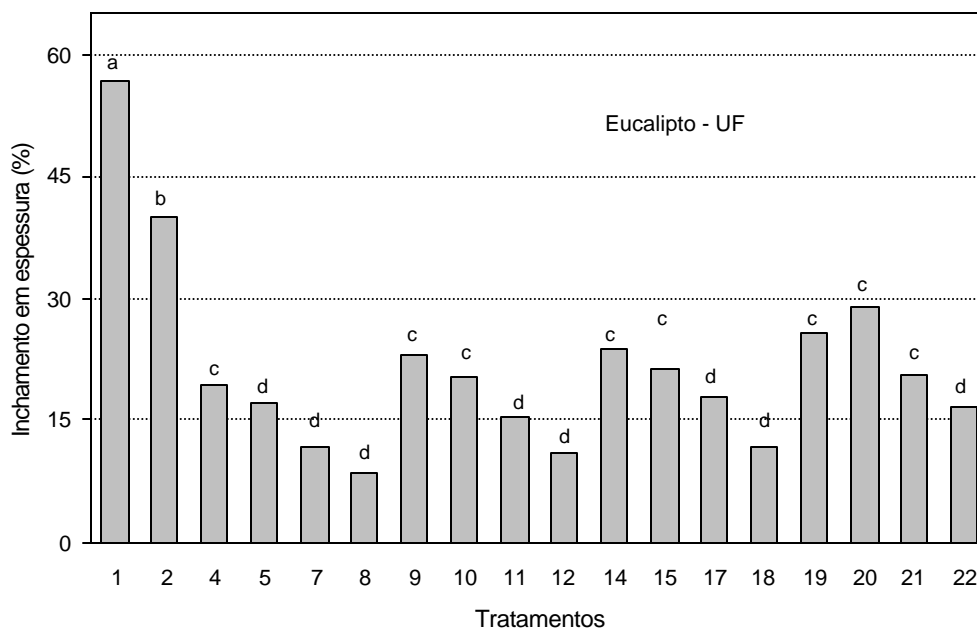
Quadro 11 - Valores médios de inchamento em espessura (%), após 24 horas de imersão em água, em função das espécies e dois tipos de adesivos utilizados

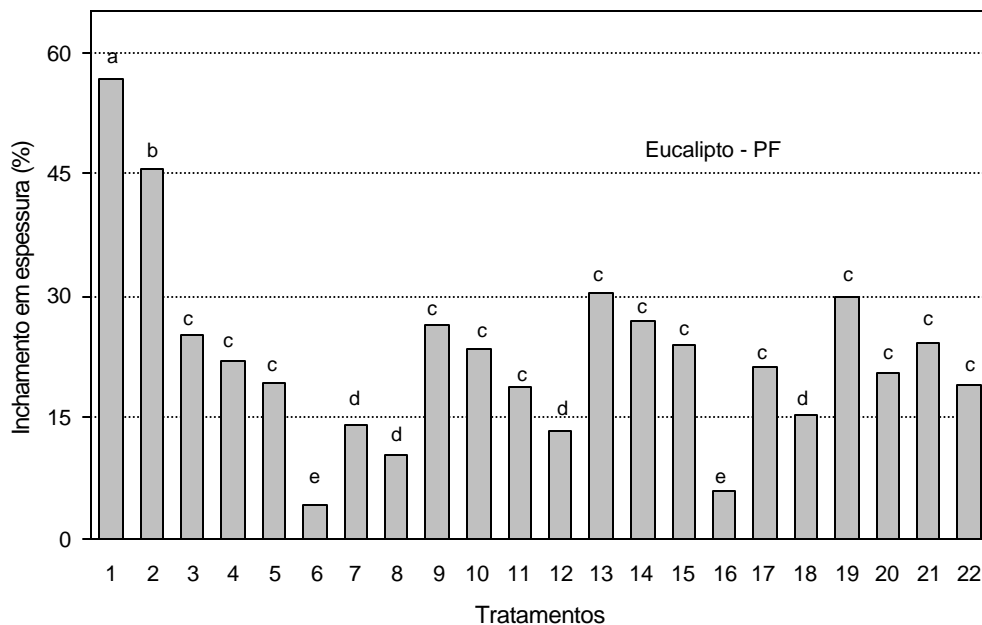
Tipo de Plástico	Tratamento	Nível de Plástico	Nível de Adesivo	Nível de Solução de Poliestireno em Tolueno	UF		PF		
					Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus	
PS	1	0	4	0	56,75 Aa	54,25 Aa	56,75 Aa	51,75 Aa	
	2	0	6	0	40,00 Aa	40,75 Aa	45,75 Aa	37,00 Aa	
	4	25	4	4	19,25 Aa	19,00 Aa	22,00 Aa	19,00 Aa	
	5	25	6	4	17,00 Aa	16,00 Aa	19,25 Aa	12,50 Aa	
	7	50	4	4	11,75 Ba	19,50 Aa	14,00 Aa	11,50 Ab	
	8	50	6	4	8,50 Aa	7,75 Aa	10,50 Aa	6,50 Aa	
	9	25	4	0	23,00 Aa	22,80 Aa	26,40 Aa	20,80 Aa	
	10	25	6	0	20,40 Aa	16,80 Aa	23,50 Aa	15,00 Aa	
	11	50	4	0	15,50 Aa	11,40 Aa	18,60 Aa	10,00 Ba	
	12	50	6	0	11,10 Aa	10,10 Aa	13,40 Aa	9,00 Aa	
PET/PS	14	5/20	4	4	23,80 Aa	21,10 Aa	26,95 Aa	20,00 Aa	
	15	5/20	6	4	21,40 Aa	20,50 Aa	24,00 Aa	17,50 Ba	
	17	10/40	4	4	18,00 Aa	12,00 Aa	21,00 Aa	10,50 Ba	
	18	10/40	6	4	11,80 Aa	11,65 Aa	15,40 Aa	9,75 Aa	
	19	5/20	4	0	28,80 Aa	25,35 Aa	30,00 Aa	24,00 Aa	
	20	5/20	6	0	26,65 Aa	24,60 Aa	20,35 Ab	21,00 Aa	
	21	10/40	4	0	20,60 Aa	15,20 Aa	24,20 Aa	12,70 Aa	
	22	10/40	6	0	16,65 Aa	13,40Aa	18,95 Aa	11,60 Aa	
	<b>Sem Adesivos</b>								
	PS	3	25	0	6	.	.	25,00 A	19,75 A

PET/P S	6	50	0	6	.	.	4,25 A	7,50 A
	13	5/20	0	6	.	.	30,50 B	41,00 A
	16	10/40	0	6	.	.	6,00 A	15,25 A
CV (%)					16,31	16,37	20,19	19,23

Em cada tratamento e cada adesivo, letras maiúsculas comparam espécies pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

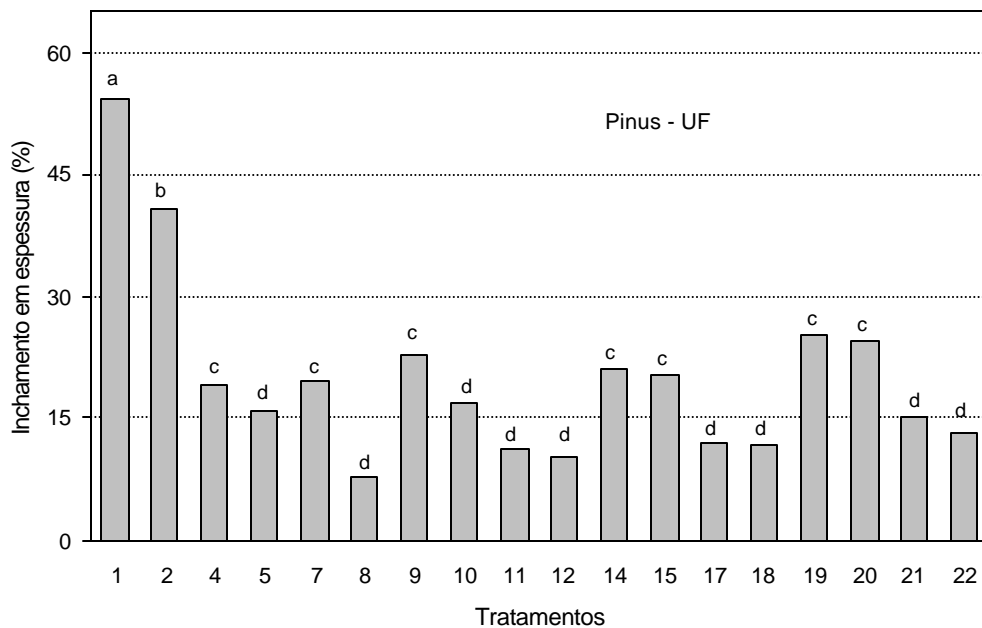
Em cada tratamento e cada espécie, letras minúsculas comparam adesivos pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade.

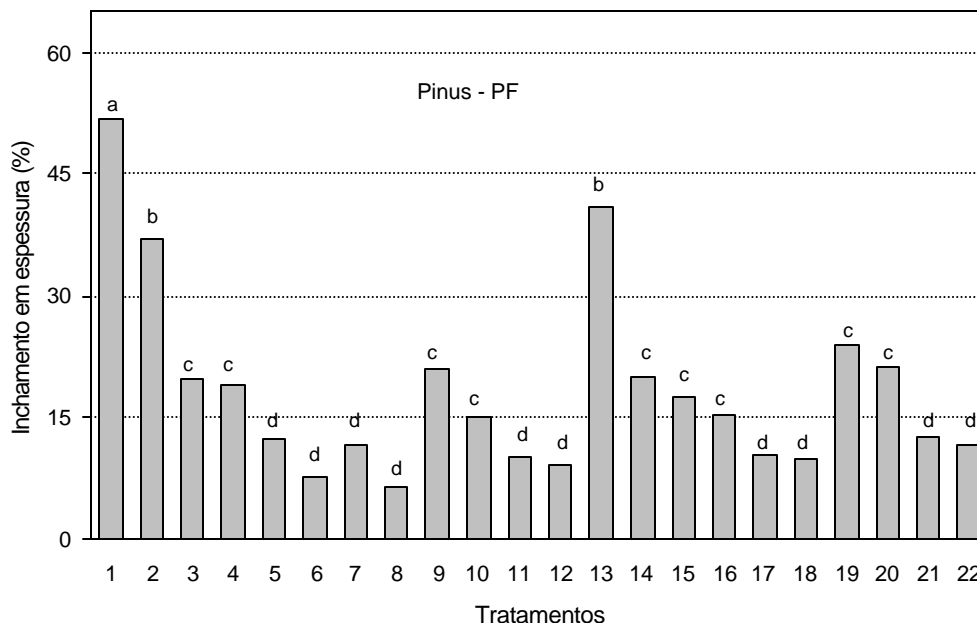




Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 25 - Efeito dos tratamentos no inchamento em espessura, após 24 horas de imersão em água; nas chapas produzidas com partículas de eucalipto/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).





Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-knott, em nível de 5% de probabilidade.

Figura 26 - Efeito dos tratamentos no inchamento em espessura, após 24 horas de imersão em água; nas chapas produzidas com partículas de pinus/plástico, para os adesivos uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (PF).

De acordo com os resultados apresentados, o inchamento em espessura foi, de forma geral, afetado pela quantidade de adesivo e nível de poliestireno associado à solução de tolueno. Na Figura 24, representativa das chapas produzidas com madeira de eucalipto e adesivo de uréia-formaldeído, observa-se que todos os tratamentos à base de plástico foram mais resistentes ao inchamento do que as testemunhas. Embora dentro de um mesmo nível de plástico, nem sempre tenha sido detectado diferença significativa entre os tratamentos, pelo teste de Scott-Knott, houve uma tendência de menor inchamento nas chapas produzidas com 6% de adesivo. O efeito positivo da solução de poliestireno em tolueno, pode ser verificada ao se comparar, por exemplo, os tratamentos 4 e 5 com tolueno e as correspondentes 9 e 10 sem tolueno. O tratamento 4 não diferiu estatisticamente do tratamento 9, ambos com 25% de poliestireno e 4% de adesivo, entretanto, numericamente, é evidente a diferença entre ambos. Para o tratamento 5 e 10, o emprego da solução poliestireno em tolueno foi fundamental

para melhorar o inchamento em espessura. Em ambos os casos acredita-se que o tolueno ao dissolver parcialmente o poliestireno, este, associado à temperatura e pressão aplicadas ao sistema, tenha formado uma estrutura em rede na qual as partículas de madeira ficaram retidas impedindo sua expansão, principalmente no sentido transversal pois, na direção longitudinal, da fibra de celulose o inchamento é relativamente menor. Outra comparação pode ser feita quando se consideram os tratamentos 17 e 18 com 10/40% de PET/PS e solução de poliestireno em tolueno e os tratamentos 21 e 22, com a mesma relação de plástico, porém sem tolueno. Neste caso, o tratamento 17 diferiu estatisticamente de seu correspondente, enquanto os tratamentos 18 e 22 foram iguais, no entanto numericamente os produtos elaborados com solução de poliestireno mostraram ser mais resistentes ao inchamento em espessura. É também possível identificar que os tratamentos com 25 e 50% de poliestireno são, em sua maioria, estatisticamente ou numericamente superiores, quanto ao inchamento em espessura, do que os tratamentos com 5/20 ou 10/40% de PET/PS, isto é, as primeiras apresentaram valores médios, para esta propriedade, inferiores aos da mistura de PET/PS, para um mesmo nível de adesivo. Esta característica pode também ser evidenciada ao se comparar, nas chapas de madeira/plástico produzidas com partículas de madeira de pinus e adesivo de fenol-formaldeído, os tratamentos 9 e 10 com 10% de poliestireno com os tratamentos 19 e 20 com 10/40% de PET/PS. Para um mesmo nível de adesivo, embora os tratamentos não diferiram estatisticamente, em valores numéricos os últimos apresentaram um nível de inchamento superior aos primeiros. O estudo das demais figuras leva a resultados idênticos aos avaliados na Figura 24.

As chapas produzidas sem adesivo evidenciam a importância da solução de poliestireno em tolueno como agente promotor de adesão. Pelos resultados obtidos, acredita-se que as partículas de poliestireno ao serem parcialmente dissolvidas e, favorecidas pelas condições de prensagem, aderiram entre si gerando um sistema no qual as partículas de madeira ficaram impedidas de se expandir. YOUNGQUIST et al. (1992), determinaram em chapas produzidas pela mistura de 80% de partículas de madeira, 10% de poliéster e 10% de adesivo de fenol-

formaldeído, após 24 horas de imersão em água fria, valores médios de incha-  
mento em espessura iguais a 19%, para chapas produzidas com 90% de partículas  
de madeira e 10% de poliéster, este valor se elevou para 59,9%.

## 5. CONCLUSÕES

A possibilidade de fabricação em nível laboratorial de chapas de baixa densidade pela mistura de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus elliottii* Engelm., com partículas de poliestireno (PS) e politereftalato (PET), utilizando como agentes de ligação adesivos de uréia-formaldeído, fenol-formaldeído e solução de poliestireno em tolueno, foi evidenciada pelos resultados obtidos, os quais atenderam, em quase sua totalidade, as exigências de qualidade estabelecida pela ANSI/A 208.1-93, para comercialização de chapas de madeira aglomerada.

A extrapolação desses resultados para a escala industrial, entretanto, exige o desenvolvimento de outros estudos de forma a adequar os parâmetros de produção, pois a técnica de produção aplicada neste trabalho se diferencia dos tradicionais métodos de produção de compósitos termoplásticos que envolvem a fusão do plástico utilizado como elemento matricial, o que não é possível de ser executado com o poliestireno e o PET, devido ao seu elevado ponto de fusão o que acarretaria a completa degradação das partículas de madeira. Desta forma, o emprego do tolueno torna-se necessário para a obtenção de produtos de boa qualidade, como pôde ser verificado pelos resultados obtidos nas chapas onde se aplicou a solução de poliestireno em tolueno, que foram geralmente superiores aos demais produtos, com ou sem plástico.



Considerando a possibilidade de se produzir chapas de madeira/plástico pela mistura desses constituintes, os resultados obtidos permitem estender a presente conclusão com os seguintes comentários:

As chapas produzidas com níveis mais reduzidos de plástico, solução de poliestireno em tolueno e 6% de adesivo, independente da mistura empregada, apresentaram valores médios de resistência à tração perpendicular superiores às demais chapas.

As chapas produzidas com níveis mais elevados de plástico, particularmente o poliestireno e solução de poliestireno em tolueno tiveram a resistência ao arrancamento de parafusos favorecida, independente da mistura empregada.

Chapas produzidas com proporções de 50% de partículas de madeira e 50% de poliestireno (50:50) e solução de poliestireno em tolueno apresentaram valores médios de módulo de ruptura, geralmente, superiores aos determinados nas demais chapas. Para as chapas produzidas pela mistura de PET/PS, os valores médios encontrados nas chapas com a relação 5/20% de PET/PS e 6% de adesivo foram, de modo geral, superiores aos demais. Os valores médios para o módulo de elasticidade em flexão estática seguem a mesma tendência observada para o módulo de ruptura.

A absorção de água e o inchamento em espessura foram menos intensos nas chapas produzidas com solução de poliestireno em tolueno, maior quantidade de plástico e nível mais elevado de adesivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Mat-formed wood particleboard:** specification ANSI A 208.1.1993. Gaithersburg: National Particleboards Association, 1993. 9p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard method for tensile properties of plastics, Vol.08.01 Plastics, n.1, p.638-689. Philadelphia, PA. 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. Standard definitions of terms relating to wood-base fiber particle panel materials. Philadelphia: ASTM D 1554. 1986.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panels:** ASTM D 1037-91. Philadelphia: ASTM, v.04.09, 1991. (Annual Book of ASTM Standards).
- ANDERSEN, A.W.; TROUGHTON, G.E. New phenolic formulations for bonding higher moisture content OSB panels. **Forest Products Journal**, v.46, n.10, p.72-76, 1996.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO PLÁSTICO. Plástico moderno. São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PÁINEIS DE MADEIRA AGLOMERADA-ABIPA. Paraná: ABIPA, 2000. (Boletim informativo)
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO – BNDES. Produtos florestais. Área de operações industriais – gerência setorial 1, 2001.

- BEECH, J.C. The thickness swelling of wood particleboard. **Holzforschung**, v.29, n.1, p.11-18, 1975.
- BESHAY, A.D.; KOKTA, B.V.; DANEAL, C. Use of wood: fibers in thermoplastics composites II: Polyethylene. **Polymer Composites**, v.6, n.4, p.261-271, 1985.
- BOHNER, A.W.; GERTJEJANSEN, R.O. Effect of three species of logging slash on the properties of aspen planer shavings particleboard. **Forest Products Journal**, v.25, n.12, p.12-36, 1975.
- BREGNER, K.I.; SCHNEIDER, M.H.; JONES, R.T. The influence of moisture content on the flexural strength of styrene-polymerized wood. **Forest Products Journal**, v.38, n.4, p.55-58, 1988.
- BRITO, E.O. A viabilidade de utilização de espécies de Pinus para a produção de chapas de composição estruturais "Waferboard". Curitiba. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 1984. 104p. (Dissertação Mestrado).
- BRUNBAUCH, J. Effect of flake dimensions on properties of particleboards. **Forest Products Journal**, v.5, p.243-246, 1960.
- BÜHRER, E.N. Química e Tecnologia dos Plásticos. Imprensa da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1996. 127p
- CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Mechanical properties of curaua fiber reinforced polypropylene composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 3, 2000, Botucatu. **Proceedings...** Botucatu: UNESP/USP/EMBRAPA, 2000. p.450-453.
- CETEA INFORMATIVO. Centro de Tecnologia de Embalagem. Instituto de Tecnologia de Alimentos-ITAL. v.9, 1977. (Boletim Técnico, 4)
- CHINA, CHINESE ACADEMY OF FORESTRY. Preliminary study on mechanical properties balance of wood/plastic fiber composite. **China Wood Industry**, v.12, n.3, p.19-24, 1998.
- COSTA, T.H.S. **Preparação e caracterização de compósitos à base de polipropileno e fibras de madeira**. Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano (IMA). Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 211p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.
- 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.

- DALVAG, H.; KLASON, C.; STROMUALL, H.E. The efficiency of cellulosic fillers in common thermoplastics II Filling with processing aids and coupling agents. **Inter. Journal Polym. Mater.**, v11, p.9-38, 1985.
- DYACHKOVSKII, F.S. New synthetic polyolefin composites. **Trip**, v.1, n.9, p.274, 1993.
- ELLIS, S.C. Effect of resin particle size on waferboard adhesive efficiency. **Wood and Fiber Science**, v.25, n.3, p.214-219, 1993.
- ELLIS, S.C.; RUDDICK, J.N.R.; STEINER, P.R. A feasibility study of composites produced from telephone directory paper, plastics, and other adhesives. **Forest Products Journal**, v.43, n.7/8, p.23-26, 1993.
- 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. 15p. 1996.
- FAO. Tableros de fibra y tableros de madera aglomerad Roma. FAO, 1959. 212p.
- FELIX, J.M.; GATENHOLM, P. The nature of adhesion in composites of modified cellulose fibers and polypropylene. **Journal of Applied Polymer Science**, v.42, p.609-620, 1991.
- FOREST PRODUCT LABORATORY. Wood Handbook: wood as na engineering material. Washington: USDA/FS, 1987. 466p. (Agriculture Handbook, 72)
- FOURCHE, G. An overview of the basic aspects os polymer adhesion. Part 1. Fundamentals. **Polym. Eng. and Sci**, v.35, n.12, 1995. 957p.
- FURTADO, M.R. Aplicações novas prometem dobrar o uso de recicladas. **Plástico Modemo**, n.266, 1996.
- GARDNER, D.J.; DAVALOS, J.F.; MUNICPALLE, V.M. Adhesive bonding of pultruded fiber – reinforced plastic to wood. **Forest Products Journal**, v.44, n.5, p.62-66, 1994.
- GEIMER, R.L.; CLEMONS, C.M.; WOOD JR., J.E. Density range of compression – molded polypropylene – wood composites. **Wood and Fiber Science**, v.25, n.2, p.163-169, 1993.

- GEIMER, R.L.; MONTREY, H.M.; LEHMANN, W.F. Effects of layer characteristics on the properties of three layer particleboards. **Forest Products Journal**, v.25, n.3, p.19-29, 1975.
- GEORGE, O. Principles of Polymerization, 3 rd ed., Jonh Wiley & Sons, New York, 1991, p.27.
- GONZALES, G.; CLEMONS, Com.; MYERS, G.F, HARTEN, T.M. Effects of several ingredient variables on mechanical properties of wood fiber-polyolefin composites blend in a thermokinetic mixer. **Mat. Res. Soc. Symp. Proc.**, n.266, p.127. 1992.
- HALLIGAN, A.F. A review of thickness swelling in particleboard. Spring Verlad. 1970. **Wood Science and Techonoly**. v.4, p.301-312, 1970.
- HAN, G.S.; ICHINOSE, H.; TAKASE, S.; SHIRAISHI, N. Composites of wood and polypropylenes III. **Mokuzai Gakkaishi**, v.35, p.1100-1104. 1989.
- HASELEIN, C.R.; VITAL, B.R.; VALENTE, O.F.; DELLA LUCIA, R.M. Fabricação de chapas de aglomerado com madeiras de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) e de embaúba (*Cecropia* sp.). **Rev. Árvore**, v.13, n.1, 67-84, 1989.
- HAWKE, R.N.; SUN, B.C.; GALE, M.R. Influence of mat moisture content on strenght properties of polyisocyanat-bonded hardboard. **Forest Products Journal**, v.42, n.11, p.61-68, 1992.
- HEEBINK, B.G.; LEHMANN, W.F.; HEFTY, F.V. Reducing particleboard pressing time: exploratory study. F.P.L. 180, Madison, 1972. 13p.
- HOSSEINY, F.; PAGE, D. The mechanical properties of single wood pulp fibres: Theories of strength. **Fibre Science and Technology**, v.8, n.21, p. , 1975.
- HSE, C.Y. Porperties of flakeboards from hardwoods growing on southern pine sites. **Forest Products Journal**, v.25, n.3, p.48-53, 1975.
- IWAKIRI, S.A. **A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus**. Curitiba, 1979. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. (Tese de Doutorado).
- JOHNS, W.E. Isocyanate bonded aspen flakeaboard. **Forest Products Journal**, v.31, n.1, p.15-20, 1981.

- KARMAKER, A.C.; YOUNGQUIST, J.A. Injection molding of polypropylene reinforced with short jute fibers. **Journal of Polymer Science**, v.62, p.1147-1151.1996.
- KASPER, J.B.; CHOW, S. Determination of resin distribution in flakeboard using x-ray spectrometry. **Forest Products Journal**, v.30, n.7, p.37-40, 1980.
- KEINERT Jr., S. Chapas de partículas estruturais a partir de *Pinus* e *Eucalyptus* spp. In: SIMPÓSIO BILATERAL BRASIL-FINLÂNDIA SOBRE ATUALIDADES FLORESTAIS. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1988. p.315-326.
- KEINERT JR.; S. & MATOS, J.L.M. Utilização de *Pinus pinaster* para a fabricação de chapas de partículas. **Revista Floresta**, v.17, n.1/2, p.113-120, 1987.
- KELLY, M.W. Critical Literature Review of Relation-Ships Between Processing Parameters and Physical Properties of Particleboard. USDA Forest Service **General Technical Reports**, FPL, v.10, 1977. 65p.
- KOKTA, B.V.; CHEN, R.; DANEAULT, C.; VALADE, J.L. Use of Grafted Wood Fibers in Thermoplastic Composites: III . Polystyrene. **Polymer Composites**, v.4, 229p. 1983.
- KOKTA, B.V.; DANEAULT, C.; BESHAY, A. Use of grafted aspen fibers in thermoplastic composites: V. Effect of extreme conditions on mechanical properties of polyethylene composites. **Polymer Composites**, v.7, n.5, 1986. 337p.
- KOKTA, B.V.; DANEAUT, C. Use of grafed aspen fibers in termoplastic composites: IV. Effect of extrem conditions on mechanical properties of polyethylene composites. **Polymer Composites**, v.7, n.5. p. 1986,
- KOKTA, B.V.; DANEAUT, C. Use of grafed aspen fibers in termoplastic composites: IV. Effect of extrem conditions on mechanical properties of polyethylene composites. **Polymer Composites**, v.7, n.5. p. 1986,
- KOKTA, B.V.; MALDAS, D. Influence of Phthalic Anhydride as a Compling Agent on the Mechanical Behavior of Wood Fiber-Polystyrene Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.41, p.185-194. 1990.
- KOKTA, B.V; RAJ, R.G.; DANEAULT, T.C. Use of flour as filler in polypropylene: studies on mechanical properties. **Polymer – Plast. Technol. Eng.**, v.28, n.3, 247-259, 1989.

- KRISHNAN, M.; NARAYAN, R. Compatibilization of biomass fiber with hydrophobic materials. **Mat. Res. Soc. Symp. Proc.**, v.266, 1992. 93p.
- KRZYSIK, M.A.; YOUNGQUIST, J.A.; MYERS, G.E.; CHAHYADI, I.S.; KOLOSICK, P.C. Wood-polymer bonding in extruded and nonwoven web composite panels. In: SYMPOSIUM. 1991, Madison, WI. **Proceedings...** Madison, WI: Forest Products Research Society: p.183-189, 1991.
- KUHNE, G.; BELIMON, P. Analysis of hot-pressing of three-layered particleboard for furniture. *Eins Beitrag Zur Analyses des Heisspressvorganges. Dreischichtiger Mobelpanplatten.* 1. Holzindustrie, v.31, n.1, 1978.
- LEHMANN, W.F. Properties of structural particleboards. **Forest Products Journal**, v.24, n.1, p.19-26. 1974.
- LEWIN, M; PRESTON, J. High technology fibers., Handbook of fiber science and technology vol.III, part A, Marcel Dekker Inc., New York, 1985
- 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.
- LIPTAKOVA, E.; KUDELA, J.; PAPRZYCKI, O. The adhesion of polystyrene to wood. **Holz als Rohund werkstoff**, v.49, p.31-37. 1991.
- LUCAS, E.F. SÍNTESE DE POLÍMEROS. Apostila: Cursos Abertos ABPol. 1994.
- MALDAS, D.; KOKTA, B.V. Effects of Coating Treatments on the Mechanical Behavior of Wood-Fiber-Filled Polystyrene Composites. J. Use of Polyethylene and Isocyanate as Coating Compaments. **Journal of Applied Polymer Science**, v.40, p.917-928, 1990.
- MALDAS, D.; KOKTA, B.V. Improving adhesion of wood fiber with polystyrene by the chemical treatment of fiber with a comping agent and the influence on the mechanical properties of composites. **J. Adhes. Sci. Technol** v.3, n.7, p.529-539. 1989.
- MALDAS, D.; KOKTA, B.V. Influence of organic peroxide on the performance of maleic anhydrid coated cellulose fiber-filled thermoplastic composite; *Polym. 5.*, v.23, n.10, 1991. 1163p.
- MALONEY, T.M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing.** San Francisco: Miller Freeman Publications, 1977. 672p.

- MALONEY, T.M.; TALBOTT, J.W.; STRICKLER, M.D.; LENTE, M.T. Composition board from standing dead white pine and dead lodgepole pine. **Proceedings of the Tenth W.S.U. Symposium on Particleboard Pullman**, Washington, 1976. p.27-104.
- MANIKANDAN NAIR, K.C.; DIWAN, SM.; THOMAS, S. Tensile properties of short sial fibre reinforced polystyrene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.60, p.1483-1497, 1996.
- MANO, E.B. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.
- MANO, E.B. Resinas sintéticas: preparação e avaliação de suas propriedade. **Revista de Química Industrial**. Fevereiro de 1960.
- MANO, E.B.; BONELLI, C.M.C. A reciclagem de plásticos pós-consumidos. **Revista de Química Industrial**, n.698, p.18-22, 1994.
- MARCINKO, J.J.; DEVATHALA, S.; RINALDI, P.L.; BAO, S. Investigationg the molecular and bulk dynamics of PMDI/wood and UF/wood composites. **Forest Products Journal**, v.48, n.6, p.81-84, 1998.
- MOSLEMI, A.A. **Particleboard**. Carbandale: Southern Illinois University Press, 1974, v.1. 243p.
- NAKAMURA, R.M.; SOBRAL FILHO, M. Aglomerado de mistura de espécies tropicais da Amazônia. Brasília: IBDF, 1982. 7p. (Boletim Técnico)
- NASCIMENTO, C.R.; PACHECO, E.B.A.V.; DIAS, M.L. Reciclagem de garrafas PET. **Revista de Química Industrial**, p.706-707, 1996.
- OKSMAN, K. Improved interaction between wood and synthetic polymers in wood/polymer composites. Lulea University, Department of wood Technology. Skelleftea Campus. 1994. p.197-205.
- OKSMAN, K.; CLEMONS, C. Mechanical properties and morphology of impact modified polypapylene – wood flour composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.67, p.1503-1513, 1998.
- PIZZI, A. **Wood adhesives: chemistry and technology**. New York: Marcel Dekker, 1983, v.1, 364p.
- PIZZI, A.; MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker. 1994. 680p.



- POST, P.W. Effect of particle geometry and resin content on bending strength of oak flakeboard. **Forest Products Journal**, v.11, p.317-322, 1958.
- RAJ, R.; KOKTA, B.V. Performance of polypropylene – wood fiber composites subjected to extreme conditions. **Polym. Mater. Sci. Eng.**, v.60, 1989. 690p.
- RAJ, R.; KOKTA, B.V.; DANEALU, C. Effect of fiber treatment on mechanical properties of polypropylene – wood fiber composites; *Makromol. Chem. Macromol. Symp.*, v.28, 1989. 187p.
- RAJ, R.; KOKTA, B.V.; DANEALU, C.T. The use of isocyanates as a bonding agent to improve the mechanical properties of polyethylene – wood fiber composites; *Inter. J. Polym. Mater.*, v.14, 1990. 223p.
- RENSCH, H.P.; RIEDL, B. Characterization of chemically modified chemithermomechanical pulp by thermal analysis. Part 1. Treatment with anhydrides; *Termochimica Acta*, 205, 39. 1992
- ROZMAN, H.D.; KUMAR, R.N.; ADLI, M.R.M.; ABUSAMAH, A.; ISHAK, Z.A.M. The effect of lignin and surface activation on the mechanical properties of suberwood – polypropylene composites. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v.18, n.4, p.471-490, 1998.
- RYBNIKÁR, F. Interfacial adhesion in short-fiber composites. **Die Angew. Makromol. Chem.**, v.191, n.31, p.?? 1991.
- RYBNIKÁR, F. Interfacial adhesion in short-fibre composites. **Die Angew. Makromol. Chem.**, v.191, n.31, p. , 1991.
- SEAN, S.Y.T.; SANSCHAGRIN, B.; KOKTA, B.V.; MALDAS, D. Effect of treated wood fiber-polystyrene composites under prolonged immersion in water. **Mokuzai Gakkaishi**, v.36, n.8, p.637-643, 1990.
- SIMONSEN, J.; HONG, Z.; RIALS, T.G. The properties-of the wood-polystyrene interphase determined by inverse gas chromatography. **Wood and Fiber Science**, v.29, n.1, p.75-84, 1997.
- 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.
- SONG, X.M.; HWANG, H.Y. A study of the microscopic characteristics of fracture surface of MDI-bonded wood fiber/recycled tire rubber composites using scanning electron microscopy. **Wood and Fiber Science**, v.29, n.2, 1997, p.131-141.

- STEPHENS, R.S.; KUTSCHA, N.P. Effect of resin molecular weight on bonding flakeboard. **Wood and Fiber Science**, v.19, n.4, p.353-361, 1987.
- STEWART, H.A.; LEHMANN, W.F. High-quality particleboard from cross-grains knife-planed hardwood flakes. **Forest Products Journal**, v.23, n.8, p.52-60, 1973.
- STEWART, H.A.; LEHMANN, W.F. High quality particleboard from cross-grain, knifeplaned hardwood flakes. **Forest Products Journal**, v.9, n.7, p.203-215, 1959.
- STRICKLER, M.D. Effect of press cycles and moisture content on properties danglasfir flakeboard. **Forest Products Journal**, v.7, p.203-215, 1959.
- SUN, B.C.H.; HAWKE, R.N.; GALE, M.R. Effect of polyisocyanate level on strength properties of wood fiber composite materials. **Forest Products Journal**, v.44, n.3, p.34-40, 1994.
- TAKASE, S.; SHIRAISHI, N. Studies on composites from wood and polypropylene. II. **J. Appl. Polym. Sci.**, v.37, p.645, 1989.
- VITAL, B.R. Métodos de determinação da densidade da Madeira. Boletim Técnico, Sociedade de Investigações Florestais. Viçosa, 1984, 21p.
- VITAL, B.R.; HASELEIN, C.R.; LUCIA, R.M. Efeito da geometria das partículas nas propriedades das chapas de madeira aglomerada de *Eucalyptus grandis* (Hill ex-Maiden). **Revista Árvore**, v.16, n.1, p.88-96, 1992.
- VITAL, B.R.; LEHMANN, W.F.; BOONE, R.S. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. **Forest Products Journal**, v.24, n.12, p.37-45, 1974.
- 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.
- VITAL, B.R.; WILSON, J.B.; KANAREK, P.H. Parameters affecting dimensional stability of flakeboard and particleboard. **Forest Products Journal**, v.30, n.12, p.23-29, 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.

- WIGOTSKY, V. Alloys and blends home in on demanding design specs. **Plastic Engineering**, v.11, p.25-32, 1988.
- 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, 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 12934608-2. MADISON, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1993. não paginado.
- YOUNGQUIST, J.A. Wood-based composites and panel products. In: Wood Handbook – Wood as an engineering material. **Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. (Cap. 10).
- YOUNGQUIST, J.A.; KARMAKER, A.C. Injection Molding of Polypropylene Reinforced With Short Jut Fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v.62, p.1147-1151. 1996.
- YOUNGQUIST, J.A.; KRZYSIK, A.M.; MUEHL, J.H.; CARLL, C. Mechanical and physical properties of air-formed wood-fiber/polymer-fiber composites. **Forest Products Journal**, v.42, n.6, p.42-48, 1992.