

DIONE MARCOS LIMA COSTA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA FABRICADOS POR TERMO-
COMPRESSÃO, COM PARTÍCULAS DE EUCALIPTO, POLIETILENO
TEREFTALATO (PET) E POLIESTIRENO (PS)**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2003

DIONE MARCOS LIMA COSTA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA FABRICADOS POR TERMO-
COMPRESSÃO, COM PARTÍCULAS DE EUCALIPTO, POLIETILENO
TEREFTALATO (PET) E POLIESTIRENO (PS)**

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

APROVADA:

Prof. Hélio Garcia Leite

Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Conselheiro)

Pesq. Ana Márcia M. L. Carvalho

Pesq. Antônio da Silva Maciel

Prof. Benedito Rocha Vital
(Orientador)

AGRADECIMENTO

A Deus, pelo dom “liberdade de vida”.

À CAPES, pela concessão da bolsa sem a qual não estaria aqui hoje.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realizar esta capacitação.

Aos mestres educadores do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pelos ensinamentos; em especial ao Professor Hélio Garcia Leite, Ricardo Marius Della Lucia e o Professor orientador Benedito Rocha Vital, pelo incentivo, pela orientação e pelo convívio durante a realização deste curso.

Ao Dr. Antônio da Silva Maciel, pesquisador do Laboratório de Chapas e Painéis do DEF/UFV, pelo apoio nas atividades desenvolvidas e pelo companheirismo.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira e do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, pela colaboração e amizade.

À EUCATEX-SP – Empresa de Produção de Chapas e Painéis, pela doação das partículas de *E. grandis*.

À Débora Rodrigues, minha esposa, pela paciência nas horas ausentes e pela motivação.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

DIONE MARCOS LIMA COSTA, filho de João Teixeira Costa e Maria de Lourdes Lima Costa, nasceu em Formiga, Minas Gerais, em 07 de outubro de 1973.

Em 2001 graduou-se em Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Em agosto de 2001, iniciou o curso de Mestrado em Ciência Florestal, na área de Tecnologia da Madeira, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, concluindo-o em julho de 2003.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	vi
ABSTRACT	Viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Compósitos plástico-madeira	3
2.1.1. Introdução	3
2.1.2. Histórico	4
2.2. Matérias-primas	6
2.2.1. Plásticos	6
2.2.2. Agentes de acoplamento	8
2.2.3. Elementos lignocelulósicos	11
2.3. Processamento	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Material utilizado	14
3.2. Preparação das partículas	14
3.3. Adesivo e aditivo	15
3.4. Preparo e prensagem das chapas	16
3.5. Testes físicos e mecânicos	17
3.6. Delineamento experimental e análise dos dados	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1. Densidade	20
4.2. Umidade de equilíbrio higroscópico	20
4.3. Propriedades mecânicas das chapas	21
4.3.1. Resistência a flexão estática	21

4.3.2. Resistência ao arrancamento de parafusos	24
4.3.3. Resistência a tração perpendicular	26
4.4. Propriedades físicas das chapas	27
4.4.1. Adsorção de vapor de água e inchamento em espessura	27
4.4.2. Expansão linear	30
4.5. Avaliação da influência do teor de PS e PET por regressão	32
4.5.1. Efeito dos tratamentos na flexão estática	32
4.5.2. Efeito dos tratamentos na tração perpendicular	36
4.5.3. Efeito dos tratamentos no arrancamento de parafusos	37
4.5.4. Efeito dos tratamentos na umidade de equilíbrio higroscópico	38
4.5.5. Efeito dos tratamentos na estabilidade dimensional	40
5. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

RESUMO

COSTA, Dione Marcos Lima, M.S. Universidade Federal de Viçosa, Agosto de 2001. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de compósitos plástico-madeira fabricados por termo-compressão, com partículas de Eucalipto, Polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS).** Orientador: Benedito Rocha Vital. Conselheiros: Alexandre Santos Pimenta e Ricardo Marius Della Lucia.

O aumento da quantidade de resíduos sólidos produzidos nos grandes centros urbanos, particularmente aqueles derivados das indústrias de plástico, tem despertado a atenção e motivado os pesquisadores a buscar soluções, visando o seu aproveitamento para a geração de novos produtos. Hoje, a tecnologia de gerenciamento de resíduos, com enfoque na geração de novos produtos, é uma tendência mundial. Um dos materiais com grande potencialidade para ser associado à madeira, com vista à produção de painéis compostos, são o polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS). Esse produto, já utilizado no exterior, tem sua importância como uma grande alternativa para a utilização de materiais reciclados a partir de resíduos de plástico, madeireiros e agrícolas. Foram produzidas e avaliadas as propriedades físicas e mecânicas de chapas compostas de partículas de madeira de *E. grandis*, PET e PS. O experimento foi instalado num delineamento inteiramente casualizado com 14 tratamentos e 2 repetições. Vinte e oito chapas foram produzidas com dois tipos de plásticos (PS e PET), uma espécie de madeira (*E. grandis*) e um nível de adesivo (8%). Os resultados obtidos foram comparados com o mínimo exigido pela norma comercial ANSI/A (1993) e analisados por

Análise de covariância e de regressão. Os valores experimentais das propriedades mecânicas demonstram que as chapas mais resistentes foram aquelas fabricadas com 50% de PS aditivado (T4) e 25% de PS sem aditivo (T5). Quanto às propriedades físicas, as chapas com maior estabilidade dimensional foram aquelas fabricadas com 50% de PS e aditivo ou não (T4 e T6). A adição de PS em solução não afeta a estabilidade dimensional das chapas. A análise dos tratamentos por regressão indicou que a inclusão do PET e PS permitiu a produção de chapas com maior estabilidade dimensional, por causa dentre outros fatores, da característica hidrofóbica dos plásticos. Em contrapartida, a inclusão do PET e PS diminuiu a resistência mecânica das chapas, devido principalmente, à baixa quantidade de aditivo utilizado e a falta de uniformidade na geometria das partículas.

ABSTRACT

COSTA, Dione Marcos Lima, M.S. Universidade Federal de Viçosa, July, 2003.
Valuation physical and mechanical properties of composites plastic-wood by term-compression, with particle of Eucalipto, polystyrene (PS) and polyethylene tereftalato (PET). Adviser: Benedito Rocha Vital. Committee Members: Alexandre Santos Pimenta and Ricardo Marius Della Lucia.

The increase amount of solid residues produced in the great urban centers, particularly those produced by the plastic industries, has called the attention of the researchers and motivated them to find solutions aiming the use of solid residues in a way that allows new products to be made out of it. Today, the residues management technology, emphasizing the making of new products, is a world-wide trend. One of the materials, with great potentiality, that can be associated with the wood aiming the production of composites panels, is by polyethylene tereftalato (PET) and polystyrene (PS). This product, already used in other countries, has its importance as a great alternative for the use of recycled materials from plastic residues, lumber and agriculturists. Particleboards were fabricated with *Eucalyptus grandis* particles, and particles of PS and PET. The experiment was installed in a completely randomized design with 14 treatments and 2 repetitions. Twenty-eight boards were produced with two types of plastics, a wood specie (*Eucalyptus grandis*) and 8% of ureia-formaldehide. Board properties were compared with the minimum values established in the commercial standard ANSI/A (1993) and analyzed by Analysis of covariance and regression. The most resistant board were

those manufactured with 50% of additive PS (T4) and 25% of PS without additive (T5). Boards with major stability dimension were those manufactured with 50% of PS particles. Addition of PS solution did not affect the dimension stability of those boards. Regression analysis indicated that adding of PET or PS allowed the production of boards with the best dimension stability, because plastics are no hygroscopic. However, adding PET and PS, lowered the mechanical resistance of the boards.

1. INTRODUÇÃO

A década passada foi marcada pela maior conscientização da sociedade sobre os danos que o uso indiscriminado dos recursos naturais pode causar ao meio ambiente, levando as pessoas a assumirem uma postura mais crítica em relação as questões ambientais. Atualmente, o aumento da quantidade de resíduos sólidos produzidos nos grandes centros urbanos, particularmente aqueles derivados das indústrias beneficiadoras de plásticos, tem despertado a atenção, sendo fonte de preocupação para muitos setores da sociedade. Os problemas gerados pelo lançamento destes resíduos em lixões, rios e aterros, como, por exemplo, os envazes de bebidas carbonatadas, têm motivado os pesquisadores a buscar soluções visando seu aproveitamento para a geração de novos produtos, visto que, a legislação brasileira não permite o emprego de plásticos reciclados para a produção de embalagens para bebidas e alimentos.

Vários materiais têm sido produzidos com plástico reciclável e muitos outros estão em fase de pesquisa, todos visando um aumento da reciclagem. Segundo Boeglin et al. (1997), um dos maiores objetivos do desenvolvimento sustentável é o manejo dos resíduos sólidos municipais e industriais. Segundo Rowell et al. (1997), uma nova e promissora área do desenvolvimento de novos materiais é a da combinação de fibras naturais (madeira, resíduos da agroindústria, etc.) com resinas termoplásticas. Esta combinação não só permite aumentar a

reciclagem de plásticos, como também possibilita agregar valor aos resíduos da produção madeireira e da agricultura, aumentando a renda do produtor rural.

Deste modo, atualmente, os plásticos constituem foco de atenção em várias partes do mundo, atraindo pesquisadores na busca de novas tecnologias que permitam a reutilização desta matéria-prima e sua posterior conversão em novos produtos. Levantamentos efetuado pelo CEMPRE (Compromisso Empresarial para a Reciclagem), indicam que os plásticos ocupam entre 15% e 20% do volume do lixo brasileiro. Os tipos de plásticos mais encontrados nos lixões urbanos são o polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e o polietileno tereftalato (PET), sendo os polietilenos de baixa e alta densidade (PEBD e PEAD) e o PET, os mais abundantes. Segundo dados da pesquisa “Perspectivas para a Reciclagem do Plástico”, desenvolvida pela USP, a ampliação da demanda nacional de resinas termoplásticas, de 3,2 milhões de t/ano (2000), saltará para 6,5 milhões de t/ano em 2010, decorrente da maior produtividade e da reestruturação da cadeia petroquímica (Anuário Brasileiro do Plástico, 2002).

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 com vista à produção de painéis à base de plástico-madeira (compósitos) são as resinas termoplásticas PE, PP, PVC, PET e PS, entre outras. Esses produtos, já utilizados em países como Estados Unidos e Japão, têm sua importância como grande alternativa para a utilização de materiais reciclados a partir de resíduos plásticos, madeireiros e agrícolas.

Sendo assim, o objetivo do presente estudo foi produzir e avaliar as propriedades físicas e mecânicas de chapas compostas de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* e resinas termoplásticas de PS e PET, utilizando como agente aglutinador adesivo de uréia-formaldeído (UF), e, como agente de ligação, uma solução de PS em tolueno.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Compósitos plástico-madeira

2.1.1. Introdução

O termo compósitos plástico-madeira (CPM) define os produtos que contém em sua estrutura uma mistura de partículas de madeira e de plástico em proporções variadas. Embora estes produtos tenham sido, inicialmente, produzidos na Europa, foi nos EUA e no Japão onde mais se desenvolveram, sendo disponibilizados comercialmente a partir da década de 80. De acordo com English et al. (1996), os CPM oferecem uma série de vantagens se comparados aos produtos convencionais de madeira aglomerada. A estrutura do material plástico, pela proteção que oferece às partículas de madeira, permite o emprego desses produtos em condições adversas. Efeitos de umidade, ataque de microrganismos e insetos são mínimos. A matriz plástica impermeável envolve parcial ou totalmente as partículas de madeira, protegendo ou impedindo sua expansão, aumentando com isso a estabilidade do produto elaborado. A baixa necessidade de manutenção requerida e a ausência de agentes preservativos para sua proteção são razões suficientes para a sua utilização.

Os CPM estão sendo atualmente fabricados segundo os mais diversos perfis e utilizados para as mais diversas aplicações (Wigotsky, 1988). Estes produtos vêm sendo utilizados na fabricação de 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). Segundo Youngquist (1995), os CPM podem ser pregados, parafusados e trabalhados com ferramentas convencionais.

O crescimento do mercado de CPM foi favorecido pela proibição, em alguns países, do uso do CCA (Cromo, Cobre e Arsênio), que era usado no tratamento de madeiras para usos residenciais, tais como coberturas e playgrounds. A substituição do CCA por novos e provavelmente mais onerosos preservativos de madeira irá reduzir a diferença de custos entre os CPM e a madeira serrada tratada (Clemons, 2002).

2.1.2. Histórico

O nascimento da indústria de CPM envolveu a conexão de duas indústrias com conhecimentos e perspectivas bastante distintas. A indústria dos plásticos tem o conhecimento dos plásticos que processam e a indústria florestal tem mais experiência e pesquisa no mercado de produtos florestais. Não surpreendentemente, algumas das primeiras companhias a produzir os CPM foram os fabricantes de janelas que tinham experiência com madeira e plástico (Clemons, 2002).

Apesar de serem inicialmente produzidos na Europa, os CPM têm experimentado um crescimento fantástico nos USA, onde têm sido fabricados já há alguns anos (Clemons, 2002). Desta forma, julgando pelas tendências mundiais, o futuro dos CPM parece ser dos mais promissores, porque para a maioria das aplicações esses materiais têm propriedades adequadas e são de baixo custo.

Inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos com o propósito de produzir e avaliar a qualidade dos CPM. Em 1983, a Corporation in Sheboygan, Winsconsin, começou a produzir partes do interior de automóveis usando uma tecnologia italiana

de extrusão, sendo usados polipropileno (PP) com aproximadamente 50% de partículas de madeira extrudados em várias formas. Esta foi uma das primeiras aplicações para os CPM nos USA (Clemons, 2002).

Nos anos 90, a Advanced Environmental Recycling Technologies (AERT, Junction, Texas) e a Trex (Winchester, Virgínia) começaram a produzir CPM com aproximadamente 50% de fibras de madeira em polietileno (PE). Estes compósitos foram vendidos como chapas para pisos e projetos paisagísticos, mesas para piquenique e assoalhos industriais (Youngquist, citado por Clemons, 2002). Compósitos similares foram engenhados em perfis de portas e janelas.

Em 1991 foi realizada, em Madison (USA), a primeira conferência internacional sobre CPM, com o objetivo de integrar pesquisadores e representantes industriais de ambas as indústrias, de modo que estes compartilhassem idéias e tecnologias relacionadas aos CPM. Conferências adicionais têm sido realizadas no Canadá, sendo sustentadas por meios de comunicação e revistas tecnológicas de plástico e processamento de polímeros (Clemons, 2002).

Em 1993, a empresa Andersen Corporation (Bayport, Minesota) começou a produzir, em caráter experimental, compósitos de fibras de madeira reforçadas com PVC para portas francesas. Com o desenvolvimento e aprimoramento da produção, foi disponibilizada uma linha de compósitos para janelas a partir de policloreto de vinila (PVC) e madeira (Schut, citado por Clemons, 2002).

Os CPM têm sido intensamente estudados em períodos recentes, principalmente aqueles produzidos pela mistura de madeira com PP, PE, PS e PVC (Wanage et al., 1998). Algumas indústrias mudaram seu ponto-de-vista em relação aos CPM, interesse este abastecido pelo sucesso de diversos produtos fabricados por esta tecnologia, maior conhecimento da madeira e desenvolvimento de equipamentos e aditivos específicos (Anonymous, citado por Clemons, 2002). Os produtos, geralmente, contém aproximadamente 50% a 70% de madeira, embora alguns compósitos possuam quantidade menor.

Maciel (2001) produziu painéis de madeira pela mistura, em proporções variadas, de partículas de madeira, PET e PS. Segundo este autor, as propriedades

mecânicas avaliadas atenderam, em quase totalidade, as normas de comercialização para painéis de madeira aglomerada.

2.2. Matérias-primas

2.2.1. Plásticos

Os plásticos são polímeros sintéticos constituídos pela união de moléculas de baixo peso molecular (monômeros), sólidos nas condições de uso, mas que em algum estágio de sua fabricação, são fluidos, podendo ser moldados por aquecimento, pressão ou ambos. Existem vários tipos de plásticos, possuindo propriedades e estruturas químicas diferentes, sendo usados em grande escala na produção de embalagens, principalmente de produtos alimentícios e domésticos. A sua popularização deve-se basicamente ao seu baixo custo de produção, peso reduzido, elevada resistência e à possibilidade da fabricação de peças nas mais variadas formas, tamanhos e cores. Como exemplo, temos o PE, PP, PS, PET, poliéster e nylon (Lucas, 1994).

Quanto ao comportamento frente à temperatura, os plásticos são classificados em termoplásticos e termorígidos ou termofixos. Termorígidos são plásticos que, após endurecidos pela ação do calor ou catalisadores específicos, formam ligações cruzadas entre suas unidades, tornando-os insolúveis e infusíveis, não sendo possível sua reutilização. Os termoplásticos são todos os plásticos de cadeia linear que amolecem quando aquecidos e endurecem quando esfriados, permitindo, com isso, sua reutilização para a elaboração de novos produtos pois podem ser derretidos repetidas vezes, como por exemplo, o PE, PET, PP e PVC.

Os termoplásticos podem ser originados do material de refugo dos processos industriais petroquímicos (recuperação primária) ou diretamente das indústrias de beneficiamento de plásticos, na forma de pellets, pó ou flakes. Podem, também, ser obtidos dos rejeitos pós-consumo (recuperação secundária), em suas diversas formas de depósitos coletores, sendo então reprocessados. Para isso, o material coletado passa por tratamentos de purificação, envolvendo várias operações, como seleção, corte, pré-lavagem, moagem, lavagem com água,

secagem, estocagem, extrusão, granulação e embalagem (Mano e Bonelli, 1994), onde entram em operação vários tipos de equipamentos, como sistema de transporte, aglutinadores, moinhos granuladores, trituradores, pelletizadores, etc.

O ciclo de produção e recuperação das resinas termoplásticas ocorre conforme fluxograma mostrado na Figura 1. Após a transformação dos derivados petroquímicos, são obtidos os resíduos industriais que, ao passar por equipamentos transformadores de plásticos, originarão vários tipos de resinas termoplásticas (PET, PS etc.). As matérias-primas obtidas, e consideradas fundamentais para a produção destas resinas são os hidrocarbonetos de baixo ponto de ebulição, representados principalmente pelo eteno e propeno. Após a sua fabricação, as resinas são entregues ao mercado consumidor na forma de plásticos rígidos, plásticos-filme, envases etc. Após o uso, estes materiais normalmente são descartados no ambiente como resíduos pós-consumo. Os dois tipos de resíduos, o industrial e pós-consumo, podem tomar dois destinos; ou são dirigidos para um aterro sanitário ou são seletivamente recuperados. O material recuperado pode ser reaproveitado das seguintes formas: como combustível, na reciclagem energética, para a geração de vapor d'água e energia elétrica, inexistente no Brasil; como geradores de insumos básicos, onde os hidrocarbonetos e gás de síntese retornam à central petroquímica, na reciclagem química; ou, ainda, como matéria-prima para a indústria transformadora de plásticos, após passarem por um processo de seleção, na reciclagem mecânica. Na reciclagem mecânica, os plásticos selecionados são submetidos a uma série de operações que envolvem moagem, lavagem, fusão e granulação, sendo 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 (CPM) e que volta ao mercado consumidor nas mais variadas formas (Furtado, 1996).

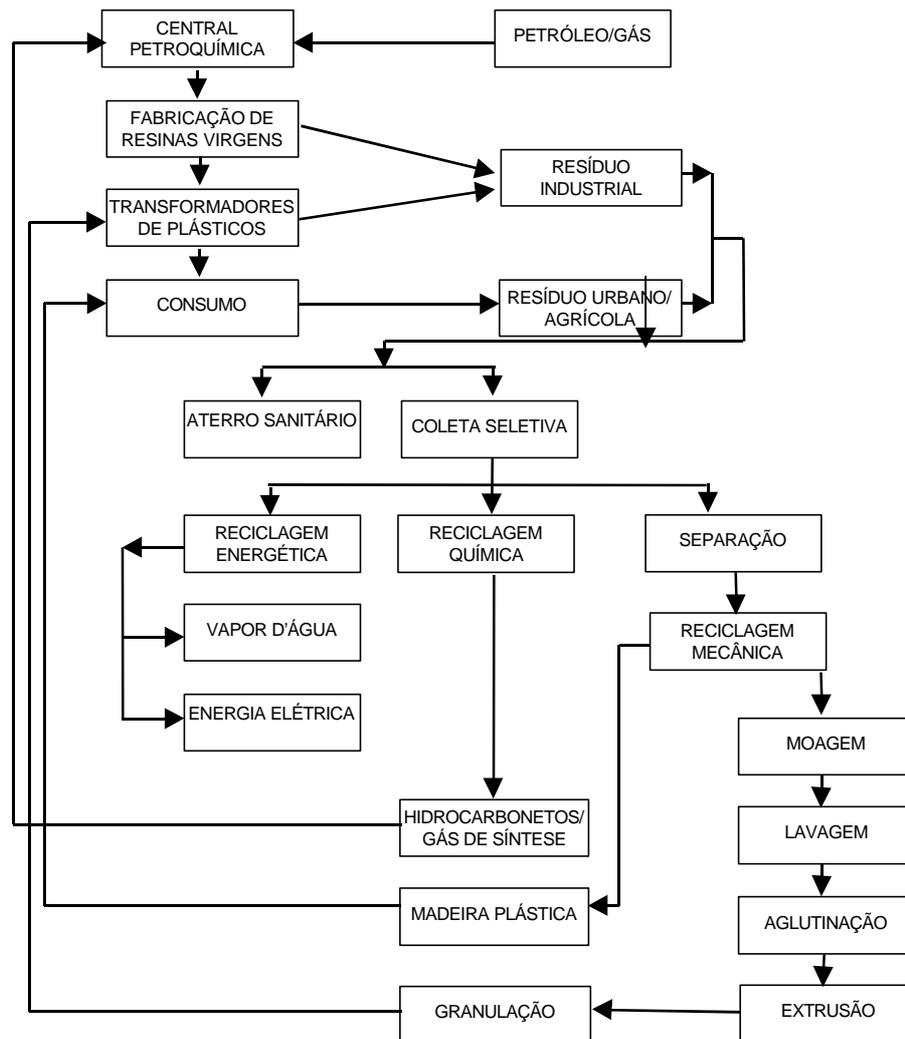


Figura 1 - Fluxograma de reciclagem de plásticos, extraído de Furtado (1996).

2.2.2. Agentes de acoplamento

Agentes de acoplamento ou de ligação (AAC) são substâncias muito importantes na fabricação de CPM por melhorarem a adesão entre as superfícies hidrofílicas da madeira e hidrofóbica dos polímeros termoplásticos, gerando, com isso, produtos com melhores propriedades mecânicas. Zu et al. (2000), descrevem em sua revisão sobre os AAC, os tipos e tratamentos com agentes compatibilizadores para melhorar a adesão entre as superfícies da madeira e do plástico. De acordo com o autor, os AAC atuam como elos de ligação entre as superfícies das fibras de madeira e do plástico estando ligados a ambas as superfícies por ligações covalentes ou fortes interações secundárias e, neste caso, ligações de hidrogênio.

Os AAC são classificados em orgânicos, inorgânicos e orgânico-inorgânicos. Agentes orgânicos são considerados melhores do que os inorgânicos devido a uma adesão mais resistente que promovem na interface e incluem os isocianatos, anidridos, amidas, imidas, acrilatos, epóxidos e ácidos orgânicos. Algumas resinas termofixas, como as de fenol formaldeído e mono ou dimetiolmelamina, também têm sido utilizadas como agentes de ligação. Estas resinas formam ligações cruzadas entre seus grupos metilênicos (-CH₂-) e os grupos metilol (-CH₂OH) e hidroxil (-OH) disponíveis nos constituintes químicos das fibras de madeira, melhorando a adesão interfacial com a matriz de plástico. Os agentes orgânicos possuem normalmente em suas estruturas grupos bi ou multifuncionais que interagem com os grupos polares da celulose e lignina para formar ligações covalentes ou de hidrogênio. Podem, também, modificar a matriz polimérica pela copolimerização grafitada, levando a uma resistente adesão devido ao equilíbrio de ligações que promovem nas interfaces.

Os agentes inorgânicos possibilitam a ação dispersante e, com isso, a neutralização da polaridade superficial das fibras de madeira melhorando a compatibilidade entre a fibra e o plástico. Silicato de sódio é um dos poucos agentes inorgânicos utilizados na produção de CPM.

Agentes do tipo orgânico-inorgânicos, incluem as silanes e os titanitos, sendo compostos híbridos em suas estruturas. Por exemplo, titanitos usualmente contém um centro de titânio e uma parte orgânica vizinha ao átomo inorgânico. A funcionalidade da parte orgânica nestes agentes determina sua eficiência nos CPM.

Os AAC compreendem os agentes de ligação propriamente ditos, os surfactantes (ativadores de superfície), agentes compatibilizadores e dispersantes. Os demais tipos de AAC atuam reduzindo a tensão interfacial entre a fibra de madeira e a matriz polimérica favorecendo a adesão entre estes materiais.

Além do emprego de AAC interfaciais, outros dois mecanismos são utilizados para melhorar a afinidade entre os elementos lenhosos e os polímeros termoplásticos: a modificação superficial das biofibras e do plástico por copolimerização grafitada e, o recobrimento por AAC das superfícies da madeira. A grafitização de um polímero consiste em introduzir em sua cadeia outros

monômeros de caráter não-polar ou polar, gerando um copolímero que terá sítios compatíveis com ambas as superfícies, hidrofóbica do plástico e hidrofílica da madeira, resultando numa melhor adesão interfacial. Alguns métodos de grafitação de polímeros consistem nos processos de xantação, radiação, malateação e copolimerização por metacrilatos. A modificação das fibras celulósicas envolve a introdução de grupos funcionais ou o recobrimento das fibras com aditivos que possuem grupos químicos adequados, de forma a tornar sua superfície menos hidrofílica, aumentando portanto, a probabilidade de interação com os polímeros hidrofóbicos. Deste modo, a utilização de isocianatos em fibras de madeira, por exemplo, forma com esses elementos grupos uretânicos, que lhe confere características hidrofóbicas, tornando-as compatíveis com as resinas termoplásticas.

Os AAC são usualmente distribuídos nas superfícies das fibras de madeira, do plástico, ou de ambas, pelos métodos da fusão, revestimento, imersão e pulverização. No método da fusão, os AAC são misturados a altas temperaturas com as fibras de madeira e plástico, sendo extrudados e transformados em pellets para uso posterior. No método de revestimento, os agentes são espalhados na superfície da madeira e do polímero em moinhos de martelo ou rotores termocinéticos a baixas ou altas temperaturas. No método de imersão, as fibras na forma de filmes de papel são imersos numa solução do AAC contendo iniciadores. Após a impregnação do papel, este é removido da solução e passado entre rolos formando um filme para modelagem. No processo da aspensão, os agentes são emulsificados e pulverizados nas superfícies das fibras de madeira.

A quantidade de AAC, utilizada na produção de CPM, é de suma importância na qualidade do produto elaborado. Geralmente, as propriedades mecânicas crescem com o aumento da concentração do agente até um certo limite, a partir do qual as propriedades decaem ou se mantêm constantes. Esta condição se deve, provavelmente, à formação de interfases diferentes entre a fibra de madeira e o plástico. Não existe, porém, uma formulação definida da quantidade a ser usada em uma determinada mistura nem a especificidade para um determinado tipo de plástico, o que demanda experimentos prévios. Entretanto, é comum encontrar

valores para esta substância variando entre 0,5% e 10%, em relação ao peso da mistura empregada.

Na produção de CPM, além dos agentes de acoplamento, outros aditivos são requeridos, principalmente aqueles envolvidos em tratamentos superficiais, como iniciadores, antioxidantes, estabilizadores e plastificantes, necessários para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

2.2.3. Elementos lignocelulósicos

Fibras e farinha de madeira (*wood flour*) são empregadas como elementos de reforço ou como cargas na elaboração de CPM. Algumas características da madeira, como disponibilidade, baixo custo, baixa abrasividade, baixa densidade e não-emanção de gases tóxicos durante o processo de produção, 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 (Kokta et al., 1986).

As granulometrias e as quantidades do material lenhoso, empregado na fabricação de CPM, são expressos 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).

2.3. Processamento

Os CPM podem ser obtidos segundo dois critérios de produção: compósitos com alto conteúdo de plásticos e compósitos com baixo conteúdo de plásticos. Um grande número de procedimentos tecnológicos pode ser associado aos compósitos com elevado conteúdo de plásticos. Entretanto, as duas maiores tecnologias de produção envolvem a moldagem por injeção e extrusão.

No processo de extrusão, o material é comprimido sobre um orifício permitindo a fabricação de peças de comprimento ilimitado de acordo com as matrizes utilizadas, podendo ter forma simples, contínua ou vasada. Atualmente, esta técnica é o método mais comum de processamento para os CPM, onde os processadores usam uma variedade de tipos de extrusoras e estratégias de processamento (Mapleston, citado por Clemons, 2002).

Na técnica da injeção, o material fundido é injetado no interior de um molde aquecido que, após resfriado, dá origem ao produto projetado. Nas operações de injeção e extrusão, a temperatura, pressão, tempo de saída da massa fundida e o tipo de plástico, são pré-requisitos para a obtenção de produtos de qualidade.

Um grande número de trabalhos publicados recentemente teve como objetivo estabelecer as características de produtos fabricados pelas técnicas da extrusão e injeção. Entretanto, apenas alguns poucos trabalhos têm evidenciados o efeito da incorporação de partículas de plástico, em mistura com partículas de madeira na produção de CPM por termo-compressão. Os poucos disponíveis mostram que essa tecnologia de produção gera produtos com boas propriedades físicas e mecânicas. O processo de produção dos CPM por termo-compressão é muito similar aquele empregado na indústria de chapas de partículas de madeira aglomerada, que são fabricadas com pequenos fragmentos de madeira e aglutinados com adesivos sintéticos, sendo submetidos à prensagem a quente por tempo suficiente para a cura da resina. A fabricação de CPM por termo-compressão inicia-se com a transformação da madeira e do plástico para partículas de tamanho desejado, sobre as quais se aplica o adesivo e aditivos pretendidos. Após esta operação, leva-se o material preparado para a seção formadora do colchão, que é em seguida prensado, por tempo determinado, sob condições de temperatura e pressão controladas. Terminado este estágio, os painéis produzidos são climatizados tendo, posteriormente, suas propriedades físicas e mecânicas avaliadas estando prontos para serem usados. Um esquema simplificado de um possível processo de produção de CPM pode ser observado na figura 2.

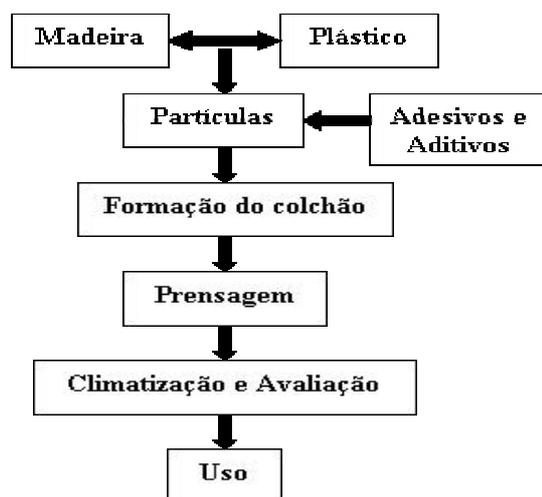


Figura 2 – Esquema simplificado do ciclo de produção dos CPM por termo-compressão.

Vários são os tipos de plásticos aptos para atuar como matriz, contínua ou descontínua, com as partículas de madeira. Entretanto, é necessário que se fundam ou amolecem 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 PP e os PEBD e PEAD, que são também os plásticos mais consumidos em nível mundial.

Os processos de fabricação dos CPM praticamente não toleram umidade. A remoção da umidade das partículas da madeira é algo crítico, pois com o aquecimento, a água em excesso pode evaporar e dar um aspecto esponjoso ao painel, resultando em um material de baixa resistência. O teor de umidade das partículas de madeira não deve ser superior a 2% (English et al., 1996).

Os termoplásticos reforçados com fibras celulósicas mantêm as propriedades básicas dos plásticos, como leveza, moldabilidade, resistência à corrosão química e oferecem uma série de benefícios (baixo custo, facilidade de processamento, maior resistência) quando comparados aos materiais não-reforçados, podendo ser usados em situações que exijam maiores solicitações mecânicas (Krishnan e Narayan, 1992).

Equipamentos têm sido desenvolvidos para alguns tipos de processamento de CPM, incluindo: manipulação de materiais, secagem, alimentação de sistemas, prensagem, além de equipamentos pós-extrusão, como tanques térmicos e serras de interrupção, entre outros (Mapleston, citado por Clemons, 2002).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material utilizado

As partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, utilizadas para a confecção das chapas, foram obtidas da empresa Eucatex-SP. As resinas termoplásticas (PET e PS) foram obtidas, respectivamente, da usina de reciclagem de lixo de Viçosa-MG e de um depósito de materiais recicláveis localizado no Campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. O poliestireno (PS) foi, também, obtido por coleta semi-seletiva em bares e lanchonetes, 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

As partículas de madeira, por serem produzidas com granulometrias diferentes, foram previamente misturadas em proporções iguais, e postas em estufa à temperatura de 103 ± 2 °C por um período de 1 hora, com o objetivo de se reduzir o seu teor de umidade para 3%.

Para a confecção das partículas de PET, inicialmente retirou-se a parte superior das garrafas e guilhotinou-se o restante em 3 partes iguais. A seguir, as seções obtidas foram trituradas em moinho de martelo equipado com peneira com

orifício de 10 mm de diâmetro. Após trituradas, as partículas foram lavadas várias vezes com sabão neutro e postas para secar à temperatura ambiente. Parte das partículas de PET foi sonicada por 30 minutos num limpador ultrasônico Branson (Modelo 2210) e aquecida em uma solução a 10% de NaOH no microondas por 10 minutos com aquecimento máximo (potência 100%). O objetivo da sonicação foi melhorar a limpeza da superfície do PET e, o do microondas, foi o de modificar a estrutura física, passando de uma superfície lisa a uma rugosa.

Para a produção das partículas de PS, os copos, pratos e envases foram lavados com sabão neutro para retirar as impurezas. Após isto, foram postos para secar à temperatura ambiente e transformados em partículas num moinho de martelo equipado com peneira com orifícios de 10 mm de diâmetro.

3.3. Adesivo e aditivo

O adesivo utilizado foi o de uréia-formaldeído (Cascamite PL 117 da ALBA-Química). O pH, tempo de gelatinização e teor de sólidos foram obtidos da seguinte forma: O pH foi medido empregando-se um pHmetro Orion, modelo 410. Para determinação do tempo de gelatinização, 3 tubos de ensaio com 10 g de adesivo por tubo foram imersos em glicerina aquecida a 170 °C, cronometrando-se o tempo em que o adesivo levou para polimerizar. O teor de sólidos foi determinado homogeneizando-se 10 g de adesivo numa placa de Petri com areia, que foram pesados e aquecidos por 24 horas, a uma temperatura de 103 ± 2 °C em estufa. Após isto, foram novamente pesados. Observou-se que o adesivo continha 61% de sólidos resinosos, pH de 7,89 e tempo de gelatinização de 56 segundos.

A quantidade de adesivo aplicado, em todos os tratamentos, foi 8% de sólidos resinosos, com base na massa total de partículas empregadas. O aditivo ou agente de ligação usado foi uma solução de PS em tolueno, preparada na concentração, em peso, ¼ de PS em relação ao tolueno, utilizando-se as partículas de PS de menor granulometria. Quando utilizada, foram aplicados 1,6% de sólidos resinosos desse aditivo, sendo calculado com base na massa total de partículas.

Foi usada, ainda, uma emulsão de parafina que foi preparada através de 41,5% de água, 48,1% de parafina e 5,2% de ácido esteárico e hidróxido de amônia (NH₄OH). Após a pesagem dos ingredientes, foram postos num becker a parafina e o ácido esteárico e aquecidos a temperatura de 95 °C. Após isto, adicionou-se água a 95 °C e, logo em seguida, o NH₄OH. Conservou-se a temperatura da suspensão por volta de 100°C, até ser obtida uma cor esbranquiçada, quando o processo foi encerrado. Essa solução foi utilizada na concentração de 0,5% por chapa, para todas as chapas, com o objetivo de se reduzir a sua higroscopicidade.

3.4. Preparo e prensagem das chapas

As massas de partículas de madeira, PET e PS foram calculadas para gerar duas chapas por tratamento. As chapas foram produzidas de forma a se ter densidade final igual a 0,65 g/cm³ e espessura igual a 10 mm, sendo que as frações de madeira e plástico foram calculadas em função destes parâmetros.

Após pesada, a massa de partículas, calculada em função dos seus respectivos tratamentos, foi colocada 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 rpm. Enquanto ele girava, promoveu-se a pulverização do adesivo e dos aditivos de forma homogênea na massa de partículas, por meio de um bico injetor acionado por um compressor de ar. O tempo médio de aplicação e homogeneização da mistura foi de sete minutos. Primeiro foi aplicado a parafina e logo após, quando prevista, a solução de PS em tolueno e, por último, o adesivo.

Após a pulverização da massa de partículas, ela foi pesada e levada à seção formadora do colchão, de dimensões 40 x 40cm. Os colchões foram formados manualmente, depositando-se esta massa sobre uma chapa de alumínio de 3,5 mm de espessura, colocada dentro da seção formadora, onde as partículas foram distribuídas uniformemente. Após isto, o colchão foi prensado em prensa de laboratório, com temperatura dos pratos de prensagem igual a 170 °C e a pressão média observada para todas as chapas foi de 32 Kgf/cm², aplicada durante 8 minutos.

Para controlar a espessura da chapa em 10 mm e evitar, assim, uma possível interferência na densidade do painel e conseqüentemente nas propriedades avaliadas, foi instalado, lateralmente, ao prato superior da prensa, uma escala graduada que se deslocava verticalmente. Após prensadas, as chapas foram acondicionadas à temperatura ambiente por um período de no mínimo uma semana, tendo em seguida, suas bordas esquadrejadas sendo reduzidas para as dimensões de 380 x 380 mm, e em seguida lixadas.

3.5. Testes físicos e mecânicos

De cada chapa foram retirados dois corpos-de-prova (CP) para execução dos ensaios de flexão estática (MOR e MOE), dois para arrancamento de parafusos e três para o ensaio de tração perpendicular, ambos feitos na superfície da chapa, conforme diagrama de corte apresentado na Figura 3. Os CP empregados para determinar a adsorção de vapor de água, a expansão linear e o inchamento em espessura foram colocados no interior de uma câmara climática com ajuste automático e independente de temperatura e umidade relativa do ar. Inicialmente, a câmara climática foi ajustada para a temperatura de 25 °C e umidade relativa de 50% até atingir o equilíbrio inicial (UE1). A seguir, aumentou-se a umidade relativa para 90% e acompanhou-se os corpos-de-prova até peso constante (UE2).

A densidade foi determinada por imersão em mercúrio ($r_{Hg}=13,6 \text{ g/cm}^3$), onde inicialmente determinou-se a massa dos corpos-de-prova pesando-os. A seguir, determinou-se o volume dos corpos-de-prova imergindo-os em um becker contendo mercúrio e que ficava em cima de uma balança analítica.

A umidade de equilíbrio higroscópico, nas condições de Viçosa-MG, foi determinado pelo método de secagem em estufa. A temperatura e umidade relativa média do ar, no primeiro semestre de 2002 em Viçosa-MG, foi de 21,2 °C e 79,9%, respectivamente.

A determinação das propriedades físicas (adsorção de vapor de água, inchamento em espessura, expansão linear) e mecânicas (flexão estática, tração perpendicular e arrancamento de parafusos) foi realizada segundo a norma ASTM

D-1037 (1991). Os valores médios de resistência foram comparados com os valores mínimos exigidos pela norma comercial para painéia aglomerados, a norma ANSI/A – 208.1-1993.

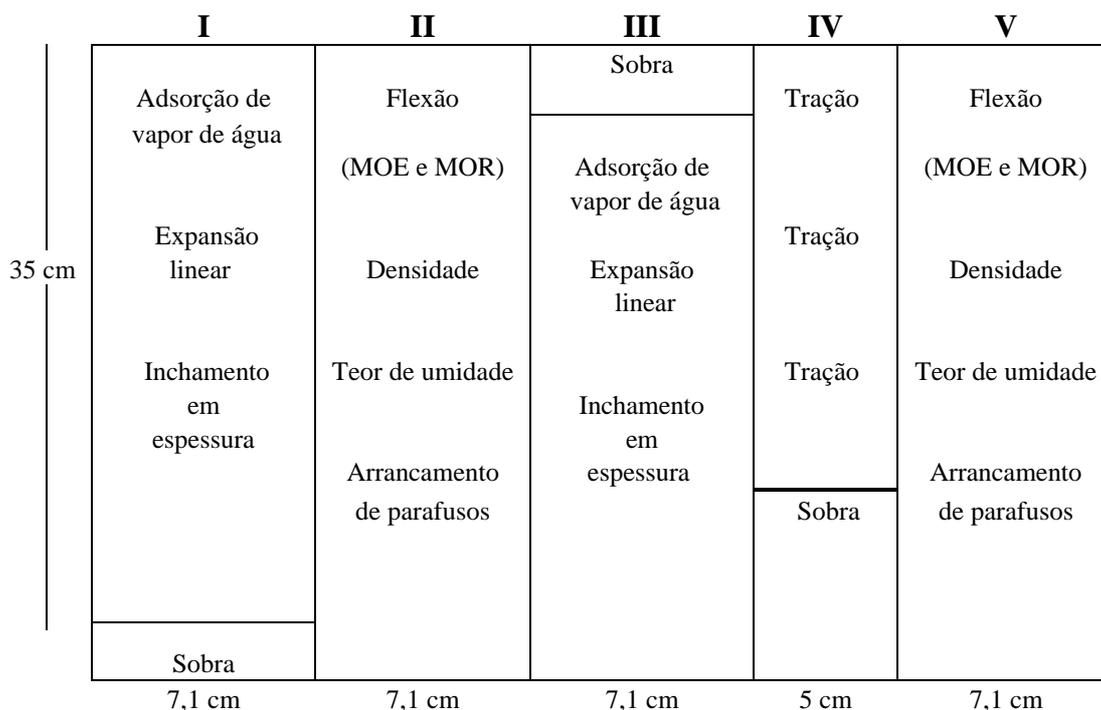


Figura 3- Diagrama de corte das chapas em cinco posições (I, II, III, IV e V).

3.6. Delineamento experimental e análise dos dados

O experimento foi instalado num delineamento inteiramente casualizado. Vinte e oito chapas foram produzidas com dois tipos de plásticos (PS e PET), uma espécie de madeira (*E. grandis*), um nível de adesivo (8%), um nível de aditivo (1,6%), uma taxa de compressão (1,3) e duas repetições. Os tratamentos consistiram de diferentes proporções de partículas de *E. grandis*, PET e PS (Quadro 1).

Os dados foram analisados pelos programas SAEG e Statistica. No Statistica foram avaliados cinco modelos estatísticos para cada parâmetro físico e mecânico, para se determinar a influência do PS e PET nas propriedades físicas e mecânicas das chapas, bem como o efeito do aditivo nessas propriedades. Quando H0 não foi rejeitado, ajustou-se o modelo sem a variável TX e usando todos os dados experimentais.

Os modelos e as hipóteses avaliadas foram:

- Modelo 1: $Y = b_0 + b_1X + b_2TX + E$ ∴ $H_0: b_2 = 0$ vs H_a : não H_0
- Modelo 2: $Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3TX + E$ ∴ $H_0: b_3 = 0$ vs H_a : não H_0
- Modelo 3: $Y = b_0 + b_1X + b_2\sqrt{X} + b_3TX + E$ ∴ $H_0: b_3 = 0$ vs H_a : não H_0
- Modelo 4: $\text{LNY} = b_0 + b_1X + b_2TX + E$ ∴ $H_0: b_2 = 0$ vs H_a : não H_0
- Modelo 5: $\text{LNY} = b_0 + b_1(1/X) + b_2TX + E$ ∴ $H_0: b_2 = 0$ vs H_a : não H_0

Y é a variável dependente (MOR, MOE, tração perpendicular, arrancamento de parafusos, teor de umidade, umidade de equilíbrio, inchamento em espessura, adsorção de vapor de água e expansão linear), X é a variável independente (teor de PET e teor de PS) e TX representa a presença ou ausência do aditivo. Selecionou-se o modelo com maior R^2 , menor erro padrão residual (S_{xy}), menor coeficiente de variação (CV), valor de F significativo e melhor distribuição dos resíduos.

Quadro 1- Percentagem de partículas de madeira, PS e PET utilizadas por tratamento, presença ou ausência de aditivo e modificação superficial do PET em ultrassom e microondas.

Tratamentos	Partículas de madeira (%)	Partículas de PS (%)	Partículas de PET (%)	Aditivo (PS-tolueno)	Ultrassom e microondas
T1	100	0	0	N	N
T2	100	0	0	S	N
T3	75	25	0	S	N
T4	50	50	0	S	N
T5	75	25	0	N	N
T6	50	50	0	N	N
T7	75	0	25	S	N
T8	50	0	50	S	N
T9	75	0	25	N	N
T10	50	0	50	N	N
T11	75	0	25	S	S
T12	50	0	50	S	S
T13	75	0	25	N	S
T14	50	0	50	N	S

Legenda: S= sim; N= não.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade

De acordo com Kelly (1977), a densidade da madeira e a taxa de compressão do colchão são os principais fatores que controlam a densidade das chapas de partículas. A densidade final da chapa depende da quantidade de partículas de madeira no colchão, teor de adesivo, tipo de quantidade de aditivo, espécie utilizada e umidade das partículas.

Os valores médios observados de densidade em cada tratamento estão apresentados no Quadro 2. A análise de variância indicou que havia diferenças significativas entre os tratamentos. Por isso, considerando a correlação positiva entre as propriedades mecânicas e a densidade (Moslemi, 1974), optou-se por analisar os resultados empregando a análise de covariância e tendo a densidade como covariável quando o seu efeito foi significativo.

4.2. Umidade de equilíbrio higroscópico

Os valores médios observados na umidade de equilíbrio nas condições ambientais de Viçosa-MG, em cada tratamento, estão apresentados no Quadro 2. As diferenças entre os teores de umidade das chapas ocorreu porque os componentes

plásticos não são higroscópicos. Assim, aumento no teor de PET ou PS proporcionou equilíbrio a teores menores. Contudo, é provável que o teor de umidade das partículas de madeira não tenha sido alterado.

Quadro 2- Valores médios observados de densidade (DENS), umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE), arrancamento de parafusos (AP) e tração perpendicular (TP).

T	PM (%)	PPS (%)	PPET (%)	AD	UM	DENS (g/cm ³)	UEH (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	AP (N)	TP (MPa)
T1	100	0	0	N	N	0,69	10,5	16,6	2307	1402	1,03
T2	100	0	0	S	N	0,62	10,3	10,3	1826	1009	0,61
T3	75	25	0	S	N	0,60	7,7	10,8	1762	1197	0,63
T4	50	50	0	S	N	0,74	5,4	17,8	2081	1591	0,72
T5	75	25	0	N	N	0,65	7,8	13,4	1986	1148	0,67
T6	50	50	0	N	N	0,69	5,3	11,0	1849	1180	0,69
T7	75	0	25	S	N	0,66	7,6	8,2	1350	983	0,47
T8	50	0	50	S	N	0,64	5,2	2,2	449	530	0,22
T9	75	0	25	N	N	0,60	7,3	7,6	1097	1037	0,53
T10	50	0	50	N	N	0,66	4,7	4,0	627	775	0,15
T11	75	0	25	S	S	0,63	6,6	4,0	928	481	0,14
T12	50	0	50	S	S	0,61	4,0	0,7	178	199	0,01
T13	75	0	25	N	S	0,59	7,3	4,9	809	653	0,19
T14	50	0	50	N	S	0,57	3,7	0,7	150	219	0,01

Legenda: T= tratamento; PM= partículas de madeira; PPS= partículas de PS; PET= partículas de PET; AD= aditivo; UM= PET submetido ao ultrassom e microonda; S= sim; N= não; DENS= Densidade; UEH= Umidade de equilíbrio higroscópico MOR= Módulo de ruptura; MOE= Módulo de elasticidade; AP= Arrancamento de parafusos; TP= Tração perpendicular.

4.3. Propriedades mecânicas das chapas

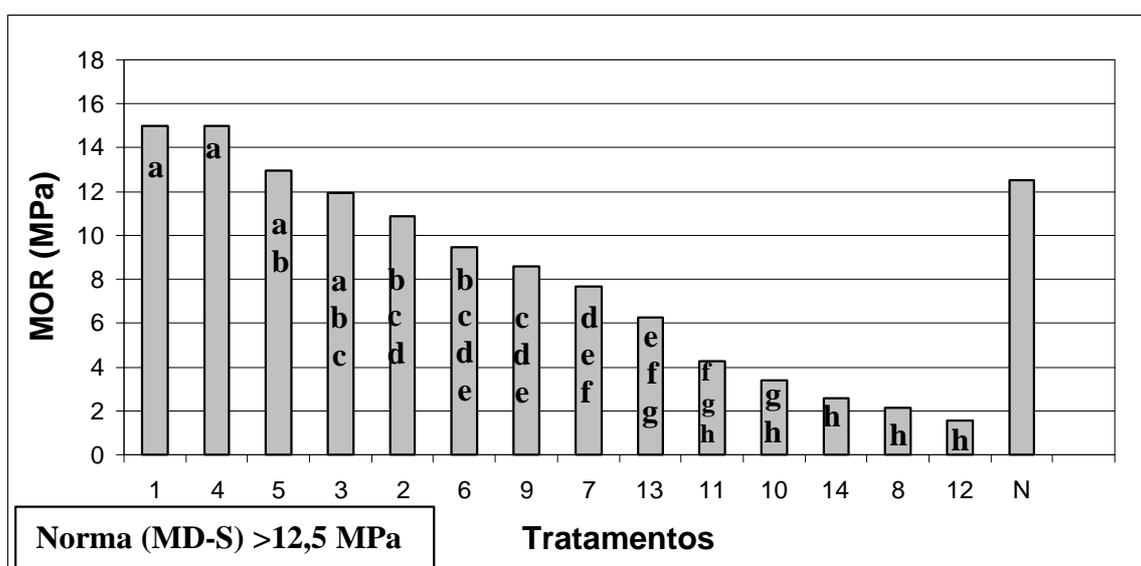
4.3.1. Resistência a flexão estática (MOR e MOE)

Segundo Iwakiri (1979), o MOR é afetado pela densidade da chapa, teor de resina, compactação do colchão, orientação e configuração das partículas. Os resultados médios observados e estimados dos ensaios em flexão estática (MOR e MOE) estão apresentados nos Quadros 2 e 3 e Figuras 4 e 5.

Quadro 3-Valores médios ajustados por análise de covariância para tração perpendicular, arrancamento de parafusos e módulos de ruptura e de elasticidade, para chapas de média densidade (MD-S = 0,64-0,80 g/cm³).

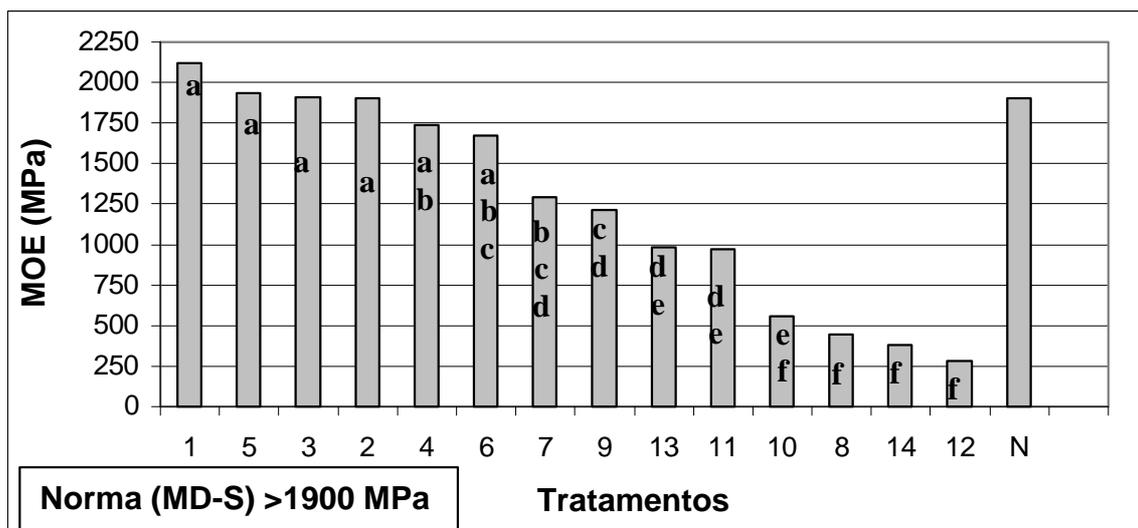
T	PM (%)	PPS (%)	PPET (%)	AD	UM	MOR (MPa)	MOE (MPa)	AP (N)	TP (MPa)
T1	100	0	0	N	N	15,00	2119	1254	0,95
T2	100	0	0	S	N	10,9	1903	1069	0,64
T3	75	25	0	S	N	11,9	1906	1310	0,66
T4	50	50	0	S	N	15,0	1739	1322	0,58
T5	75	25	0	N	N	13,0	1937	1110	0,65
T6	50	50	0	N	N	9,5	1670	1039	0,61
T7	75	0	25	S	N	7,7	1291	937	0,45
T8	50	0	50	S	N	2,1	448	512	0,22
T9	75	0	25	N	N	8,6	1215	1129	0,58
T10	50	0	50	N	N	3,4	557	720	0,12
T11	75	0	25	S	S	4,3	968	512	0,15
T12	50	0	50	S	S	1,6	281	280	0,05
T13	75	0	25	N	S	6,3	983	790	0,26
T14	50	0	50	N	S	2,6	377	398	0,11

Legenda: T= tratamento; PM= partículas de madeira; PPS= partículas de PS; PPET= partículas de PET; AD = aditivo; UM= PET submetido ao ultrassom e microondas; AP= Arrancamento de parafusos; TP= Tração perpendicular.



*colunas contendo pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si; N= norma.

Figura 4- Valores médios ajustados por análise de covariância para resistência à flexão estática (MOR), comparações entre tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade e pela norma comercial ANSI/A (1993) para chapas de média densidade (MD-S = 0,64-0,80 g/cm³).



*colunas contendo pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si; N= norma.

Figura 5- Valores médios ajustados por análise de covariância para o módulo de elasticidade (MOE), comparações entre tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade e pela norma comercial ANSI/A (1993) para chapas de média densidade (MD-S = 0,64-0,80 g/cm³).

Analisando-se, simultaneamente, o efeito de todos os tratamentos na resistência à flexão, observa-se que os maiores valores para o módulo de ruptura (MOR) foram observados nas chapas fabricadas apenas com partículas de madeira (T1) ou contendo 50% de partículas de PS aditivadas com a solução de PS em tolueno (T4), ou ainda, contendo 25% de PS (T5). As chapas menos resistentes foram aquelas contendo 50% de PET (T8, T12 e T14). A menor resistência destas chapas deve-se à sua menor densidade e à baixa quantidade de aditivo utilizado, já que este tem a função de atuar como agente de ligação entre as partículas de plástico e as de madeira (PM), proporcionando uma adesão mais efetiva entre estas. De acordo com Maciel (2001), ao utilizar a solução de PS em tolueno, há um maior favorecimento da adesão entre partículas do tipo hidrofílica (madeira) e hidrofóbica (plástico) favorecido pelo contato íntimo entre estas unidades no momento da prensagem, devido à pressão aplicada e as propriedades adesivas da solução de PS em tolueno.

A aplicação da solução de PS em tolueno, nos tratamentos contendo partículas de PET submetidas ao ultrassom e microonda, não interfere na resistência destas chapas. As chapas dos tratamentos T1, T4 e T5 produziram chapas com resistência superior ao valor mínimo estabelecido pela norma ANSI/A (1993).

O módulo de elasticidade (MOE), em flexão da madeira e derivados, normalmente apresenta uma boa correlação com a resistência à ruptura. Por isso, o efeito dos tratamentos no módulo de elasticidade de chapas presentes na Figura 5, é bastante similar ao que se observou para o MOR. Há similaridade entre os tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6. As chapas fabricadas segundo os tratamentos T1, T2, T3 e T5, ultrapassaram o valor mínimo estabelecido pela norma comercial ANSI/A (1993).

4.3.2. Resistência ao arrancamento de parafusos

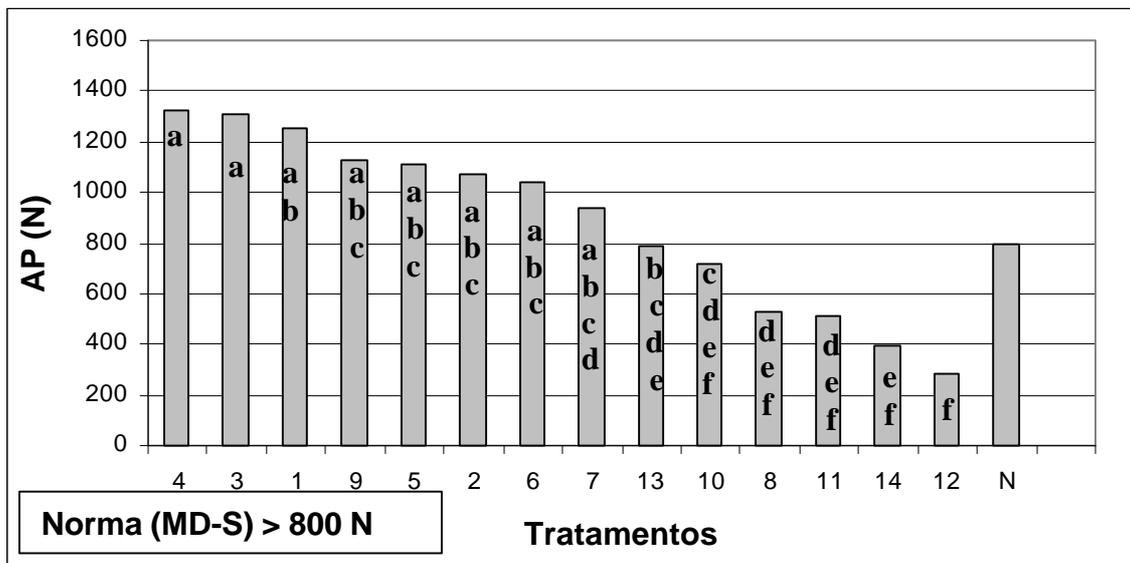
A resistência ao arrancamento de parafusos é uma propriedade importante para a indústria moveleira e em certas aplicações especiais em que o painel tem que ser perfurado. De acordo com Moslemi (1974), o teor de resina e a densidade da chapa influenciam positivamente na resistência do painel, dificultando a soltura de parafusos. Os resultados médios, ajustados por análise de covariância para esta propriedade, estão apresentados no Quadro 3 e Figura 6.

Analisando-se simultaneamente o efeito de todos os tratamentos na resistência ao arrancamento de parafusos, os maiores valores ajustados foram em chapas fabricadas apenas com partículas de madeira sem aditivo (T1), ou contendo 25% ou 50% de PS mais a solução de PS em tolueno (T3 e T4).

A inclusão de PS, na forma sólida ou em solução, não afetou de forma significativa a resistência das chapas ao arrancamento de parafusos. A aplicação da solução de PS em tolueno, nos tratamentos contendo partículas de PET submetidas ao ultrassom e microondas, não interfere na resistência destas chapas, apesar das fabricadas com partículas de PS apresentarem os maiores valores de resistência. A explicação para a alta resistência apresentada pelas chapas produzidas com PS, em comparação às produzidas com PET, está no fato do aumento de densidade nestas chapas e a melhor acomodação das partículas de PS na estrutura do colchão formado devido à geometria mais homogênea das partículas de PS. Assim, com a compactação do colchão e a formação de regiões mais coesas e melhor estruturadas

em toda a chapa, promoveu adesões mais resistentes elevando os valores de resistência desta propriedade.

Chapas contendo 100% de PM e aditivo em sua estrutura (T2) tiveram valores menores de arrancamento de parafusos em comparação à com 100% de PM sem aditivo (T1). As possíveis explicações devem-se à maior densidade observada para o tratamento T1 (0,69 g/cm³), fato este que gerou maior resistência para este tratamento, ou ainda, para uma mesma massa de partículas, a compressão utilizada na chapa do T2 pode ter sido menor. Com isto, as partículas não foram devidamente aproximadas umas das outras para que ocorresse uma boa adesão, impedindo assim, um possível efeito positivo da solução de PS em tolueno que apresenta propriedades adesivas. Em diversos tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T9) obtiveram-se chapas com resistência ao arrancamento de parafuso superior ao valor mínimo estabelecido pela norma comercial ANSI/A (1993).



*colunas contendo pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si; N= norma.

Figura 6- Valores médios ajustados por análise de covariância para o arrancamento de parafusos, comparações entre tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade e pela norma comercial ANSI/A (1993), para chapas de média densidade (MD-S = 0,64-0,80 g/cm³).

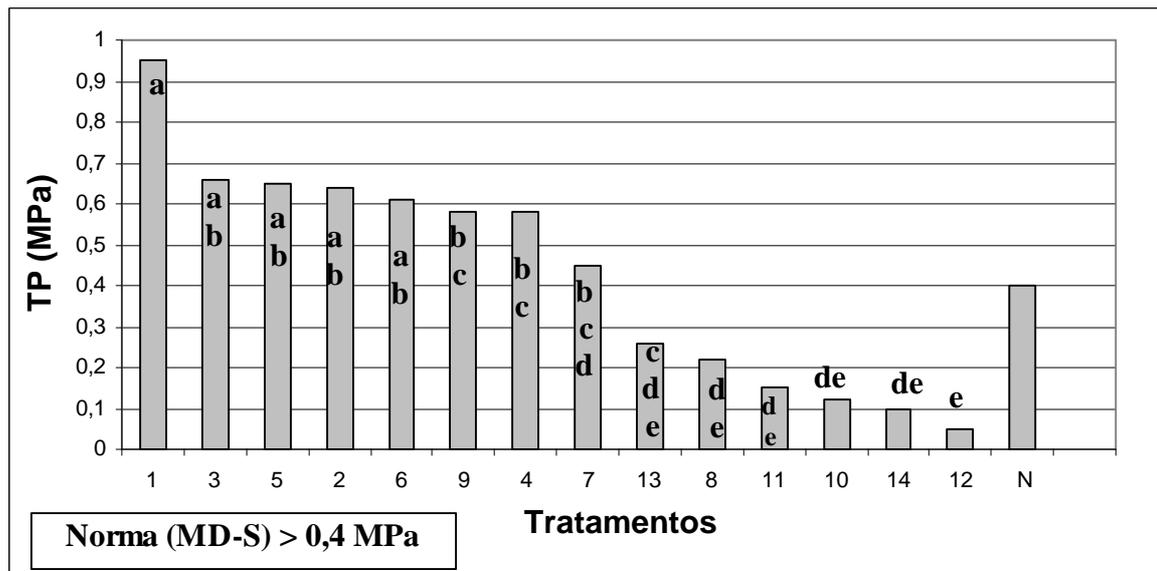
4.3.3. Resistência a tração perpendicular

A resistência a tração perpendicular é um dos testes mais importantes para se atestar a qualidade da adesão entre as partículas no momento da colagem do painel, aumentando com a densidade da chapa e com o teor de resina. De acordo com Moslemi (1974), terão maior resistência à tração perpendicular chapas produzidas com partículas curtas e espessas, em comparação à produzidas com partículas longas e finas, se mantida a mesma quantidade de adesivo. Os resultados médios ajustados para esta propriedade estão apresentados no Quadro 3 e Figura 7.

A análise simultânea do efeito de todos os tratamentos, na resistência à tração perpendicular, indicou para os tratamentos com 25% e 50% de PS aditivado ou não (T3, T4, T5 e T6), ou com partículas de madeira com e sem aditivo (T1 e T2), ou ainda, com 25% de PET (T9), os maiores valores de resistência à tração perpendicular. As chapas menos resistentes foram aquelas contendo 50% de partículas de PET (T10, T12 e T14).

Os tratamentos que superaram os valores mínimos exigidos pela norma comercial ANSI/A (1993) foram o T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T9. A aplicação da solução de PS em tolueno, nos tratamentos contendo partículas de PET submetidas ao ultrassom e microondas, não interfere na resistência destas chapas.

Nos ensaios de resistência à tração perpendicular, a norma ANSI/A 208.1-93 exige que chapas de partículas de baixa densidade atinjam o valor mínimo de 0,10 MPa. Analisando os valores médios observados, nota-se que os valores médios de resistência dos tratamentos com 50% de PET submetido ao ultrassom e microondas aditivado ou não (T12 e T14) foram muito abaixo do mínimo exigido pela norma, em especial para a tração perpendicular e MOR. A explicação está na menor densidade das chapas produzidas com este tipo de partícula de PET e a falta de uniformidade na geometria das partículas.



*colunas contendo pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si; N= norma.

Figura 7- Valores médios ajustados por análise de covariância para tração perpendicular, comparações entre tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade e valores de referência da norma ANSI/A-93 para chapas de média densidade (MD-S= 0,64-0,80 g/cm³).

4.4. Propriedades físicas das chapas

4.4.1. Adsorção de vapor de água e inchamento em espessura

Quando expostas à umidade, as chapas de partículas sofrem grandes alterações dimensionais, principalmente em espessura, afetando as propriedades físicas e mecânicas que irão ficar seriamente comprometidas, limitando o seu uso a ambientes internos e a condições de baixos esforços mecânicos. Segundo Halligan (1970), o inchamento em espessura é afetado pela geometria das partículas, espécie, densidade das chapas, quantidade de resina aplicada e condições de prensagem. Os resultados médios observados de adsorção de vapor de água e ajustados por análise de covariância para o inchamento em espessura estão apresentados nas Figuras 9 e 10 e nos Quadros 4 e 5. Os valores médios para adsorção de vapor de água não foram ajustados por análise de covariância porque não houve efeito significativo da densidade nesta propriedade.

Quadro 4- Valores médios observados para as propriedades físicas de expansão linear (EXP), umidade de equilíbrio inicial e final (UE1 e UE2), adsorção de vapor de água (AA) e inchamento em espessura (INC).

T	PM (%)	PS (%)	PET (%)	AD	UM	EXP (%)	UE1 (%)	UE2 (%)	AA (%)	INC (%)
T1	100	0	0	N	N	0,14	6,7	16,5	9,8	8,8
T2	100	0	0	S	N	0,19	6,5	16,9	10,4	9,9
T3	75	25	0	S	N	0,16	5,0	12,4	7,5	4,2
T4	50	50	0	S	N	0,19	3,5	8,4	4,9	2,0
T5	75	25	0	N	N	0,16	7,2	13,1	5,8	4,0
T6	50	50	0	N	N	0,09	4,9	8,9	4,0	2,2
T7	75	0	25	S	N	0,14	6,6	13,4	6,8	5,5
T8	50	0	50	S	N	0,11	4,9	9,3	4,5	2,6
T9	75	0	25	N	N	0,18	7,1	13,9	6,6	5,4
T10	50	0	50	N	N	0,24	5,8	9,7	3,9	3,6
T11	75	0	25	S	S	0,31	7,8	13,9	6,0	8,7
T12	50	0	50	S	S	0,54	6,1	12,6	6,5	11,9
T13	75	0	25	N	S	0,24	9,2	15,4	6,3	7,8
T14	50	0	50	N	S	0,53	6,3	13,9	7,6	11,5

Legenda: T= tratamento; PM= partículas de madeira; PS= partículas de PS; PET= partículas de PET; AD= aditivo; UM= PET submetido ao ultrassom e microondas; S= sim; N= não; EXP= Expansão linear; UE1= Umidade de equilíbrio inicial (T= 25 °C e UR= 50%); UE2= Umidade de equilíbrio final (T= 25 °C e UR= 90%); AA= Adsorção de vapor de água; INC= Inchamento em espessura.

Analisando-se, simultaneamente, o efeito de todos os tratamentos nas propriedades de adsorção de vapor de água e inchamento em espessura, os menores valores observados foram para os tratamentos T4, T6, T8 e T10.

A aplicação da solução de PS em tolueno, nos tratamentos contendo partículas de PET submetidas ao ultrassom e microondas, não interfere na adsorção de vapor de água e inchamento em espessura destas chapas.

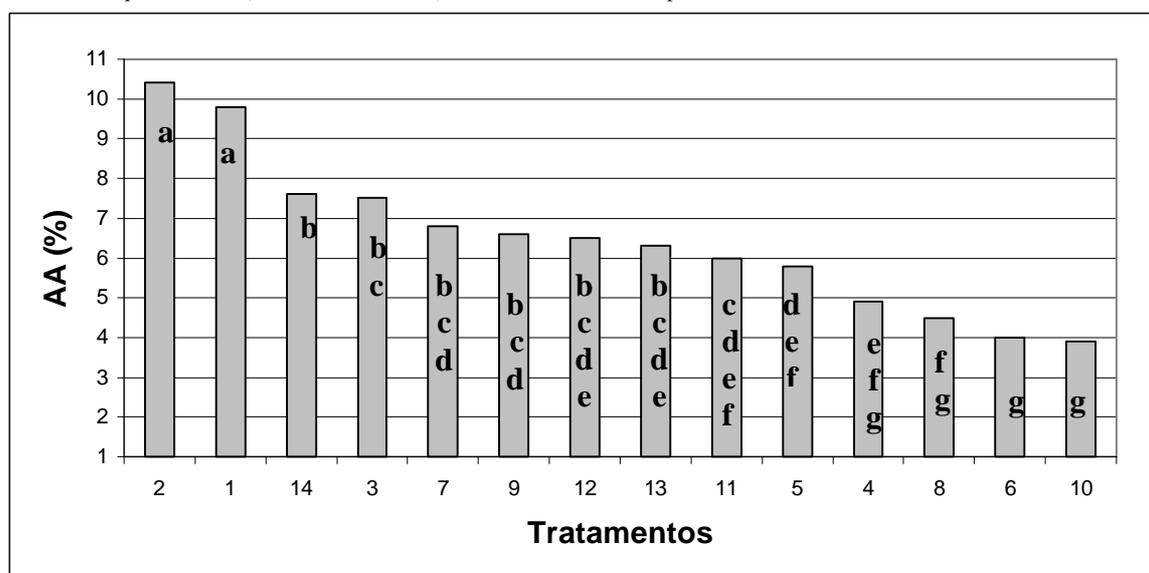
As chapas que adsorveram mais vapor de água foram aquelas contendo apenas partículas de madeira aditivadas ou não (T1 e T2).

As chapas que apresentaram maiores inchamentos em espessura foram aquelas fabricadas com 50% de PET com ou sem aditivo (T12 e T14) ou contendo apenas partículas de madeira aditivada (T2).

Quadro 5- Valores médios ajustados em cada tratamento por análise de covariância para as propriedades físicas de expansão linear (EXP), umidade de equilíbrio inicial e final (UE1 e UE2) e inchamento em espessura (INC), para chapas de média densidade (MD-S = 0,64-080 g/cm³).

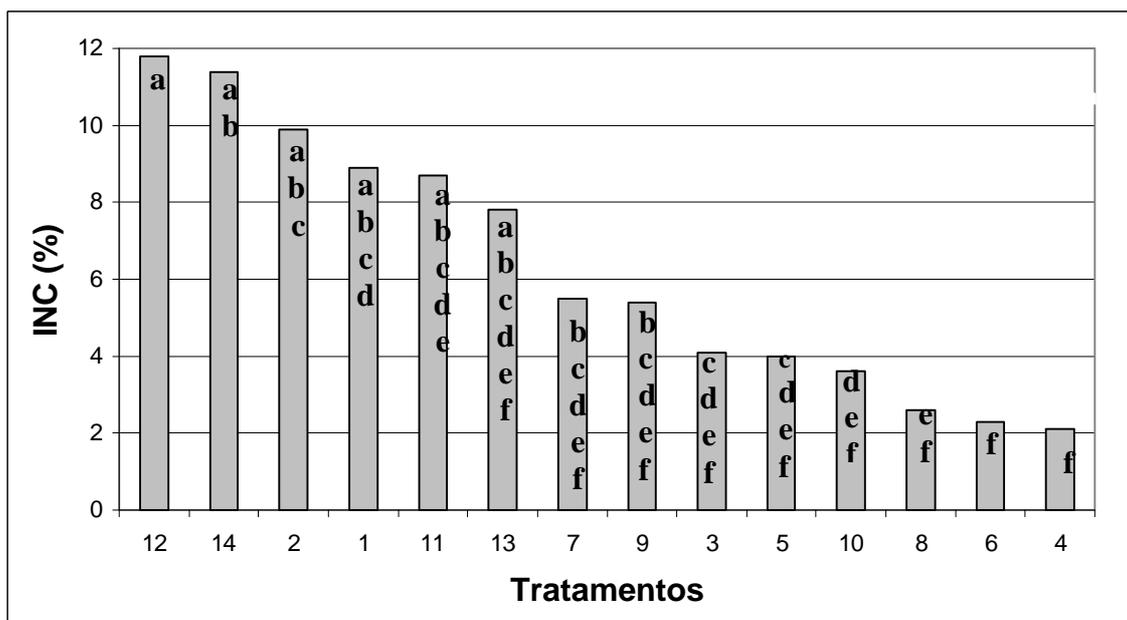
T	PM (%)	PS (%)	PET (%)	AD	UM	EXP (%)	UE1 (%)	UE2 (%)	INC (%)
T1	100	0	0	N	N	0,14	6,6	16,7	8,9
T2	100	0	0	S	N	0,18	6,5	16,8	9,9
T3	75	25	0	S	N	0,16	5,0	12,3	4,1
T4	50	50	0	S	N	0,09	3,4	8,8	2,1
T5	75	25	0	N	N	0,14	7,2	13,1	4,0
T6	50	50	0	N	N	0,11	4,9	9,1	2,3
T7	75	0	25	S	N	0,16	6,6	13,4	5,5
T8	50	0	50	S	N	0,24	4,9	9,3	2,6
T9	75	0	25	N	N	0,17	7,1	13,5	5,4
T10	50	0	50	N	N	0,24	5,8	9,8	3,6
T11	75	0	25	S	S	0,31	8,0	13,9	8,7
T12	50	0	50	S	S	0,53	6,1	12,5	11,8
T13	75	0	25	N	S	0,23	9,2	15,3	7,8
T14	50	0	50	N	S	0,52	6,4	13,6	11,4

Legenda: T= tratamento; PM= partículas de madeira; PS= partículas de PS; PET= partículas de PET; AD= aditivo; UM= PET submetido ao ultrassom e microondas; S= sim; N= não; EXP= Expansão linear; UE1= Umidade de equilíbrio inicial (T= 25 °C e UR= 50%); UE2= Umidade de equilíbrio final (T= 25 °C e UR= 90%); INC= Inchamento em espessura.



*colunas contendo pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Figura 8- Valores médios observados para adsorção de vapor de água e comparações entre tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.



*colunas contendo pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Figura 9-Valores médios ajustados por análise de covariância para inchamento em espessura, comparações entre tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade para chapas de média densidade (MD-S= 0,64-0,80 g/cm³).

4.4.2. Expansão linear

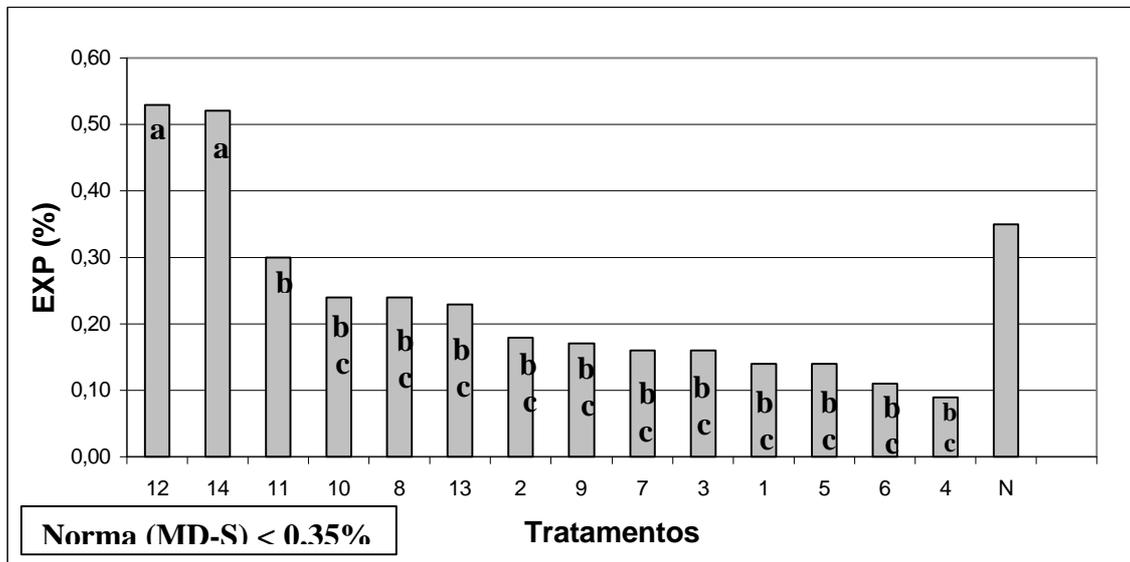
A expansão linear é uma medida da alteração de comprimento do painel. De acordo com Lehmann (1974), em situações de alta umidade relativa, o aumento no teor de resina e a adição de parafina melhoram a estabilidade dimensional, as propriedades mecânicas e a durabilidade das chapas. Os valores médios ajustados das variações em expansão linear estão apresentados no Quadro 5 e Figura 10.

Analisando-se, simultaneamente, o efeito de todos os tratamentos na expansão linear, os menores valores foram observados em chapas com 25% de PS (T5), ou com 50% de PS aditivado ou não (T4 e T6), ou ainda, contendo apenas partículas de madeira (T1).

A aplicação da solução de PS em tolueno, nos tratamentos contendo partículas de PET submetidas ao ultrassom e microondas, não interfere na expansão linear das chapas.

Apenas as chapas fabricadas com 50% de PET submetido ao ultrassom e microondas ultrapassaram o limite máximo de expansão linear estabelecido pela norma ANSI/A (1993). A explicação pode está no fato de uma possível descontinuidade provocada pelas partículas de PET inserida entre as de madeira e

que, sem estar bem interligadas, devido principalmente à baixa quantidade de aditivo utilizado, não formou regiões coesas e melhor estruturadas em toda a chapa expondo um número maior de partículas de madeira às moléculas de água do meio externo.



*colunas contendo pelo menos uma mesma letra não diferem estatisticamente entre si; N= norma.

Figura 10- Valores médios ajustados por análise de covariância para expansão linear, comparações entre tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade e valores de referência da norma comercial ANSI/A (1993) para chapas de média densidade (MD-S = 0,64-0,80 g/cm³).

4.4. Avaliação da influência do teor de PS e PET por regressão

O efeito da inclusão de partículas de PS e PET aditivadas ou não foi analisado por análise de regressão. Dada a falta de uniformidade da densidade das chapas, esta variável de processamento foi incluída nos modelos, selecionados bem como os coeficientes das equações, além das respectivas estatísticas, que são apresentadas nos Quadros 6 e 7.

4.4.1. Efeito dos tratamentos na flexão estática

Conforme pode ser observado nos Quadros 6 e 7 e Figuras 11 e 12, a inclusão de 25% de partículas de PS na estrutura da chapa ocasionou redução na resistência à flexão estática (MOR e MOE). Na medida em que se aumentou o conteúdo de partículas de PS para 50%, observou-se aumento acentuado no MOR das chapas. Para o MOE, quando da inclusão de 50% de partículas de PS, observou-se também aumento, só que de forma mais amena. A possível explicação para o aumento no MOR e MOE quando da incorporação de 50% de partículas de PS, está no fato do aumento da densidade média observada de $0,63 \text{ g/cm}^3$, para chapas com 25% de PS aditivado ou não, para uma densidade média observada de $0,72 \text{ g/cm}^3$ para chapas com 50% de PS aditivado ou não. Não houve efeito significativo da inclusão do aditivo em chapas produzidas com partículas de PS. A inclusão de PET, conforme pode ser observado nas Figuras 13 e 14, provocou redução na resistência e flexão das chapas na medida em que se aumentou o seu teor. A menor resistência destas chapas deve-se a menor densidade média observada e a baixa quantidade de aditivo utilizado. Também não se observou efeito significativo da inclusão do aditivo em chapas produzidas com partículas de PET.

Quadro 6- Modelos e coeficientes das equações de regressão ajustadas para estimar o efeito do teor de PS nas propriedades físicas e mecânicas das chapas, com seus respectivos R^2 , CV e S_{xy} .

Propriedades	Modelos de Regressão	Coeficientes da Regressão			Estatísticas da Regressão		
		b_0	b_1	b_2	R^2 (%)	S_{xy}	CV (%)
MOR	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{PS}^2 + E$	-28,4363	64,8365	-0,0013	77,1	1,7	21,1
MOE	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{PS}^2 + E$	-1140,6396	4937,5013	-0,164	88,7	81,9	6,6
AP	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + E$	-988,3624	3376,1809		54,2	172,0	19,4
TP	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{PS}^2 + E$	-0,3035	1,5384		22,1	0,2	50,0
UEH	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{PS} + E$	9,1004	1,9569	-0,1032	99,8	0,1	1,5
INC	$\text{Ln}Y = b_0 + b_1 \text{PS} + E$	2,2080	-0,0298		98,0	0,09	1,4
UE2	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \sqrt{\text{PS}} + E$	24,8428	-12,2376	-1,0003	96,3	0,7	5,5
AA	$\text{Ln}Y = b_0 + b_1 \text{AD} + b_2 \text{PS} + E$	2,2211	0,1752	-0,0166	97,7	0,06	0,9

Legenda: S_{xy} = Erro padrão residual; CV= coeficiente de variação.

Quadro 7- Modelos e coeficientes das equações de regressão ajustadas para estimar o efeito do teor de PET nas propriedades físicas e mecânicas das chapas, com seus respectivos R^2 , CV e S_{xy} .

Propriedades	Modelos de Regressão	Coeficientes da Regressão				Estatísticas da Regressão		
		b_0	b_1	b_2	b_3	R2 (%)	S_{xy}	CV (%)
MOR	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{PET} + E$	-6,7339	33,1395	-0,2374		96,3	1,2	15,0
MOE	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{PET} + E$	-721,6645	4354,5078	-31,4192		97,2	134,0	10,8
AP	$Y = b_0 + b_1 \text{PET} + E$	1391,643	-14,881			79,7	156,9	17,7
TP	$Y = b_0 + b_1 \sqrt{\text{PET}} + E$	1,0545	-0,1188			94,0	0,08	18,6
UEH	$\text{Ln}Y = b_0 + b_1 \text{AD} + b_2 \text{PET} + E$	2,3526	0,0744	-1,0159		99,1	0,03	0,45
EXP	$Y = b_0 + b_1 \text{PET}^2 + E$	0,1401	0,0038			91,5	0,02	8,7
INC	$Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{PET}^2 + E$	-9,3584	25,6371	-0,0017		87,6	1,0	15,9
UE2	$\text{LNUE2} = b_0 + b_1 \text{PET}$	2,8455	-0,0114			96,3	0,05	0,4
AA	$\text{Ln}Y = b_0 + b_1 \text{DENS} + b_2 \text{AD} + b_3 \text{PET} + E$	2,8218	-0,7879	0,0898	-1,0187	99,3	0,04	0,6

Legenda: R^2 = Coeficiente de determinação; S_{xy} = Erro padrão residual; CV= coeficiente de variação.

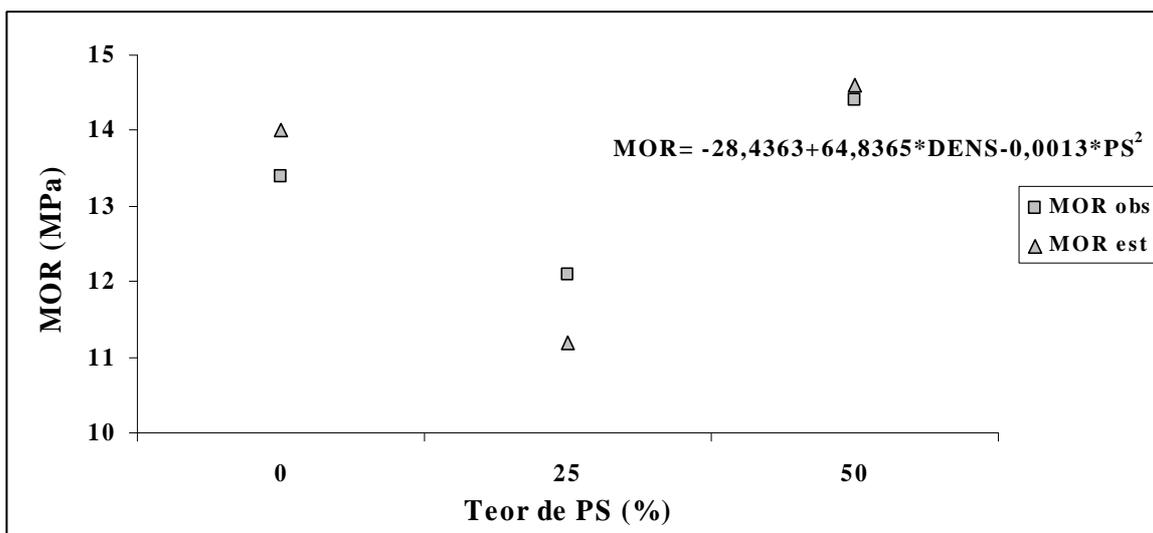


Figura 11– Média dos valores observados e estimados para resistência à flexão estática (MOR) em função do conteúdo de PS aditivado ou não.

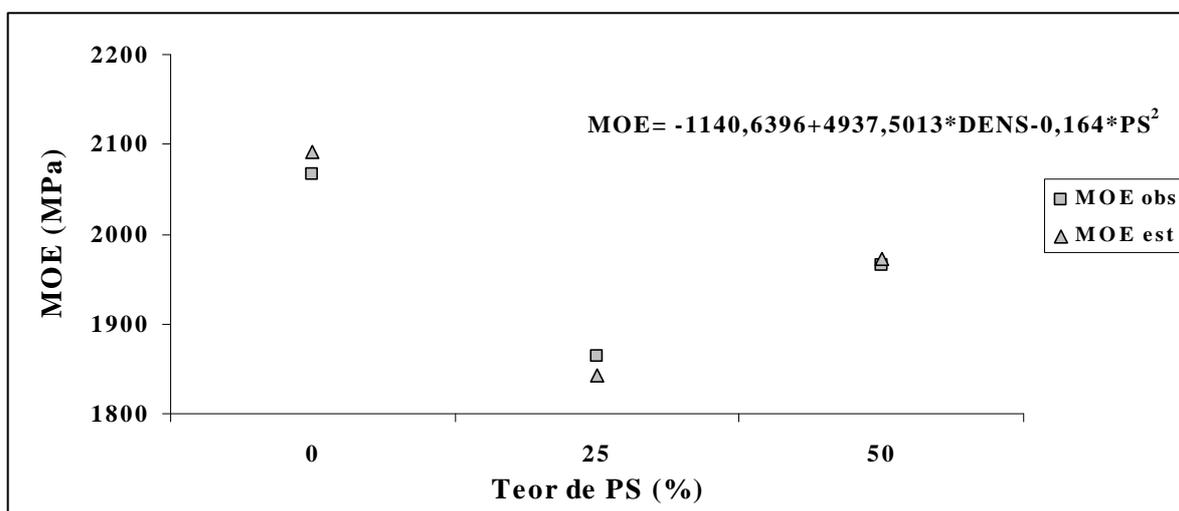


Figura 12- Média dos valores observados e estimados para o módulo de elasticidade (MOE) em função do conteúdo de PS aditivado ou não.

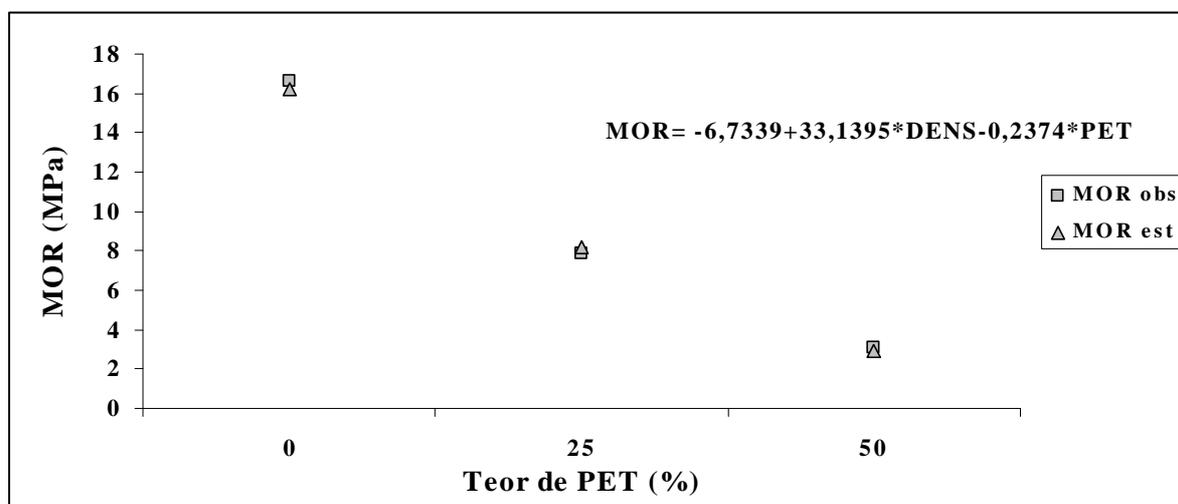


Figura 13- Média dos valores observados e estimados para resistência à flexão estática (MOR) em função do conteúdo de PET aditivado ou não.

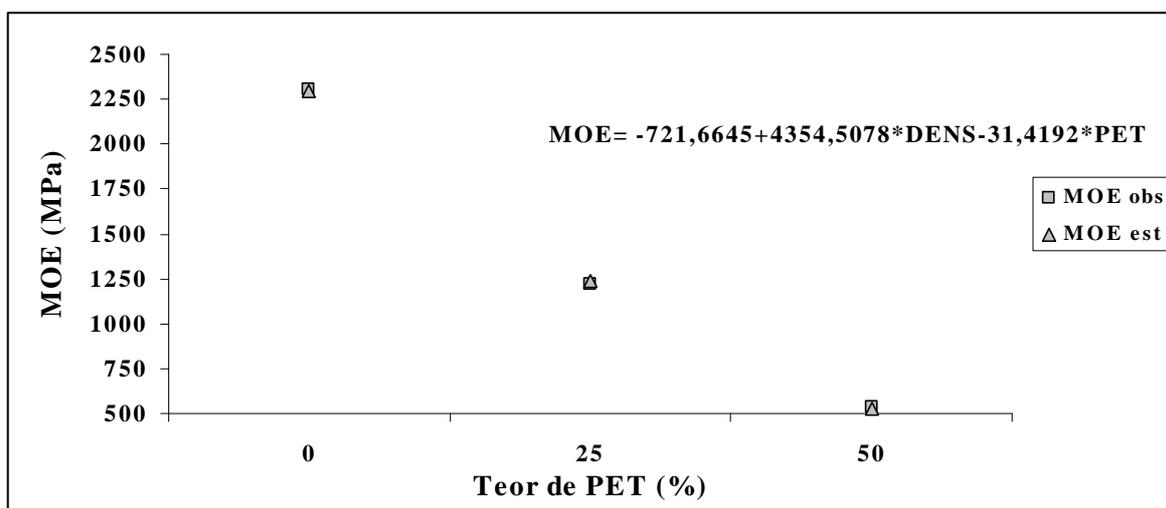


Figura 14- Média dos valores observados e estimados para o módulo de elasticidade (MOE) em função do conteúdo de PET aditivado ou não.

4.4.2. Efeito dos tratamentos na tração perpendicular

Não foi possível obter um modelo significativo que pudesse explicar o efeito da adição de PS na forma sólida ou em solução na resistência à tração perpendicular, conforme mostra o quadro 6.

A análise do efeito dos teores de PET nos tratamentos, conforme pode ser observado na Figura 15, indica que o incremento de 25% de partículas de PET causou uma diminuição acentuada na resistência à tração perpendicular das chapas. O aumento do teor de PET para 50% continuou influenciando na queda de resistência, que de 0,5 MPa caiu para 0,2 MPa. A explicação para esta queda considerável está na menor densidade das chapas produzidas com este tipo de partícula, a maior espessura das partículas de PET e a baixa quantidade de aditivo utilizada. Em 2001, após produzir compósitos termoplásticos com partículas de madeira, PET e PS, Maciel concluiu que chapas produzidas com níveis mais reduzidos de plástico e 4% de aditivo, independente da mistura empregada, apresentaram valores médios de resistência à tração perpendicular superiores às demais chapas.

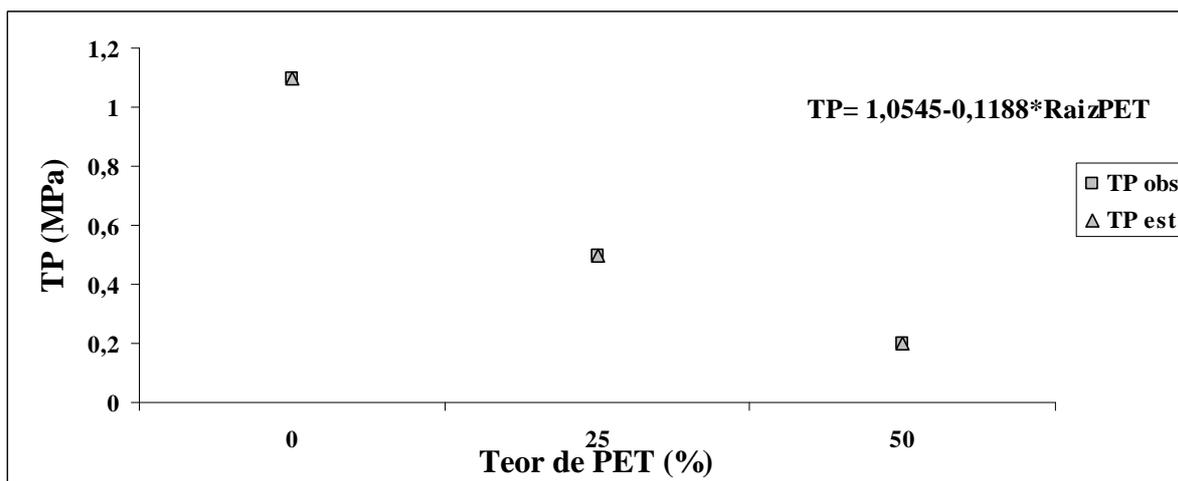


Figura 15- Média dos valores observados e estimados para a resistência à tração perpendicular (TP) em função dos teores de PET.

4.4.3. Efeito dos tratamentos no arrancamento de parafusos

O efeito dos tratamentos na resistência ao arrancamento de parafusos é indicado na Figura 16. A adição de PET às partículas de madeira, independente da adição do aditivo, ocasionou uma redução significativa na resistência ao arrancamento de parafusos. Isto decorre possivelmente devido a baixa densidade das chapas e o menor teor de aditivo utilizado (1,6%), teor considerado baixo, já que há literaturas afirmando que níveis de até 10% de aditivo podem ser utilizados com vistas a promover uma maior adesão entre as partículas de plástico e madeira. No entanto, é necessário experimentos prévios para se determinar a quantidade exata de aditivo a ser usada pela sua importância e influência nas propriedades e qualidade do painel. Maciel (2001) concluiu que as chapas produzidas com níveis mais elevados da solução de PS em tolueno (6%) tiveram a resistência ao arrancamento de parafuso favorecida, independente da mistura plástico-madeira utilizada.

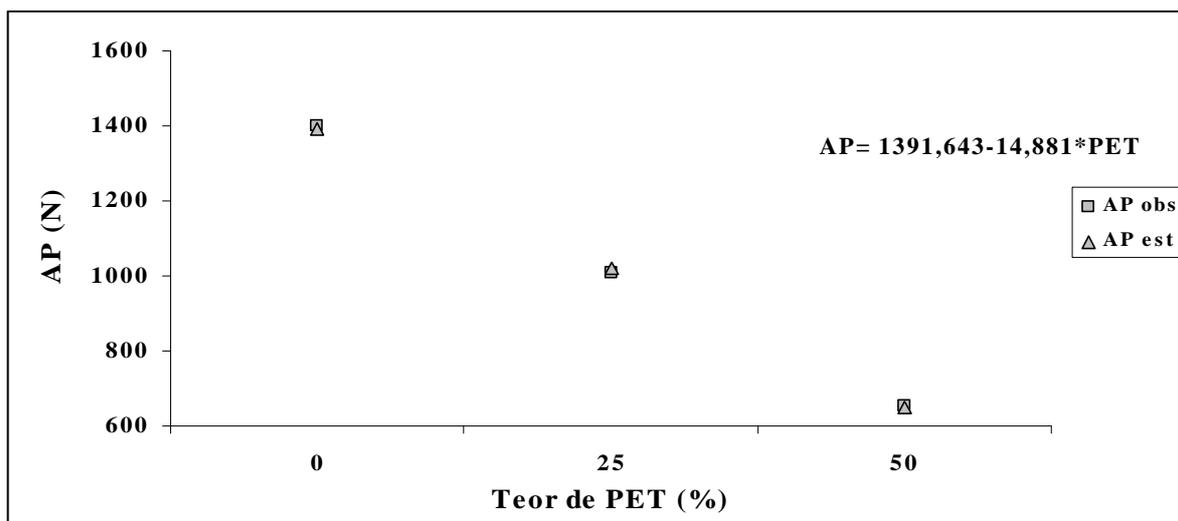


Figura 16- Média dos valores observados e estimados para a resistência ao arrancamento de parafusos (AP) em função do conteúdo de PET.

4.4.4. Efeito dos tratamentos na umidade de equilíbrio higroscópico

O efeito dos tratamentos na umidade de equilíbrio higroscópico, nas condições de Viçosa, MG, são indicados pelas equações apresentadas nos Quadros 6 e 7 e Figuras 17 e 18. A temperatura e umidade relativa média do ar no primeiro semestre de 2002 em Viçosa-MG, foi de 21,2 °C e 79,9%, respectivamente.

A inclusão de PS ou PET, aditivos ou não, nas partículas de madeira ocasionou redução na umidade de equilíbrio higroscópico. Este resultado era esperado, uma vez que tanto o PET quanto o PS não são higroscópicos.

A adição de PS em solução na matéria-prima contendo PET, conforme pode ser observado nos Quadros 4 e 5, provocou ligeiro aumento na umidade de equilíbrio final em comparação a adição do aditivo na matéria-prima contendo PS. Isto, provavelmente, foi ocasionado por alterações nos sítios de adsorção provocado pelo aditivo na molécula de celulose.

A umidade de equilíbrio em atmosfera com umidade relativa próxima à saturação das fibras, nas condições de Viçosa, MG, também foi afetado pelos tratamentos conforme pode ser observado no Quadro 2.

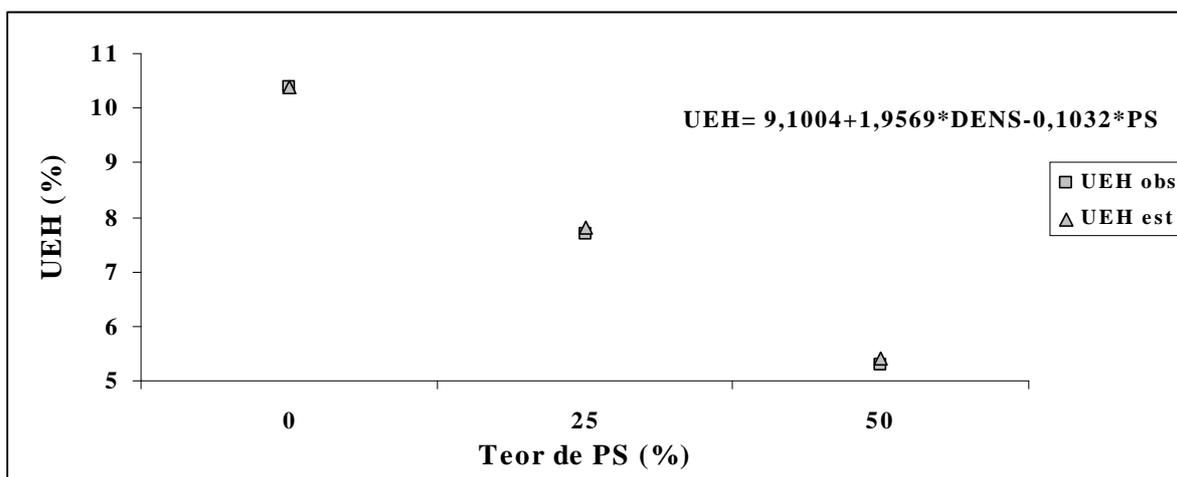


Figura 17- Média dos valores observados e estimados, em função do conteúdo de PS, para a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) nas condições ambientais de Viçosa.

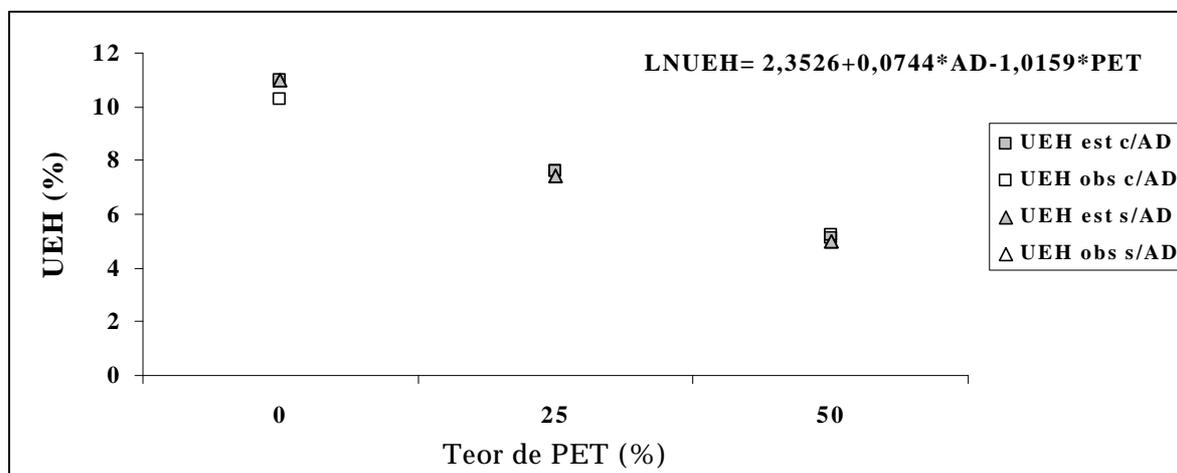


Figura 18- Média dos valores observados e estimados, em função do conteúdo de PS aditivado ou não, para a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) Nas condições ambientais de Viçosa.

4.4.5. Efeito dos tratamentos na estabilidade dimensional

A inclusão, tanto do PET quanto do PS, na composição das partículas permitiu a produção de chapas mais estáveis, conforme indicam as equações apresentadas nos Quadros 6 e 7 e pode ser observado nas Figuras 19, 20, 21, 22 e 23. Isto, porque o plástico por ser um polímero hidrofóbico, não absorve umidade do meio. Assim, quanto mais plástico houver na estrutura de um painel, menor será a quantidade de grupos hidroxílicos disponíveis nos sítios de adsorção da molécula de celulose.

A melhor estabilidade dimensional das chapas deve-se à decrescente adsorção de vapor de água observada com incrementos no teor de PET e PS. De acordo com Maciel (2001), compósitos plástico-madeira produzidos com menor quantidade de plástico e adesivo absorvem maior quantidade de água.

As chapas de partículas sofrem grandes alterações quando expostas à umidade, destacando-se o inchamento em espessura, que também foi beneficiado pelo incremento no teor de PS ou PET, conforme pode ser observado nas Figuras 21 e 22, onde observa-se que à medida em que se aumenta o teor de plástico, as chapas incham menos. Para esta propriedade, Maciel (2001) concluiu que o inchamento em espessura foi menos intenso em chapas produzidas com aditivo, maior quantidade de plástico e nível mais elevado de adesivo.

Analisando simultaneamente o efeito dos teores de PET nos tratamentos para a propriedade de expansão linear, conforme pode ser observado na Figura 22, observa-se que à medida em que se aumenta a quantidade de plástico, as chapas expandem mais. A possível explicação deve-se à descontinuidade provocada por uma partícula de plástico inserida entre as de madeira, além da ineficiência do aditivo no nível utilizado (1,6%) que, não sendo capaz de promover uma adesão consistente entre estas partículas, impediu a formação de regiões mais agregadas e estáveis dimensionalmente.

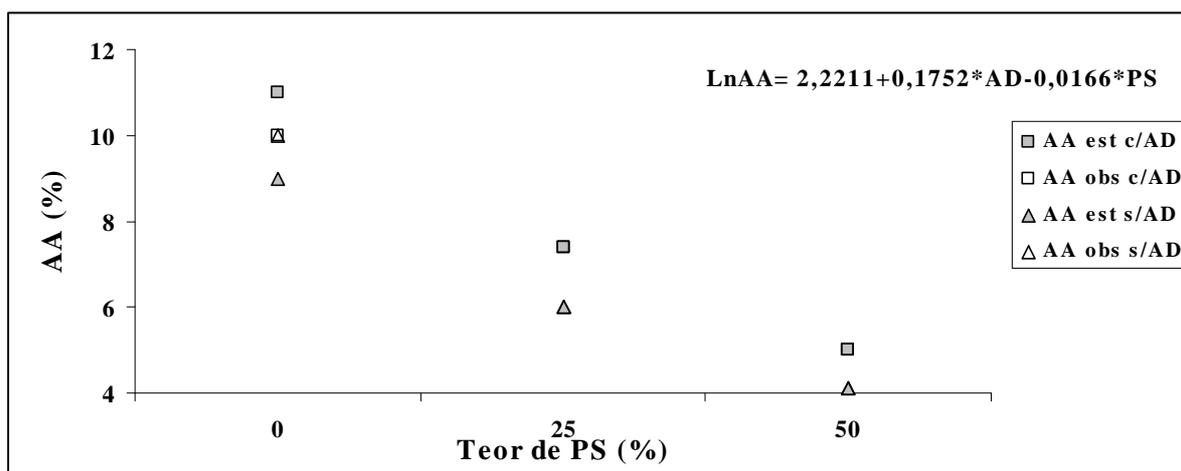


Figura 19- Média dos valores observados e estimados para adsorção de vapor de água (AA) em função do conteúdo de PS aditivado ou não.

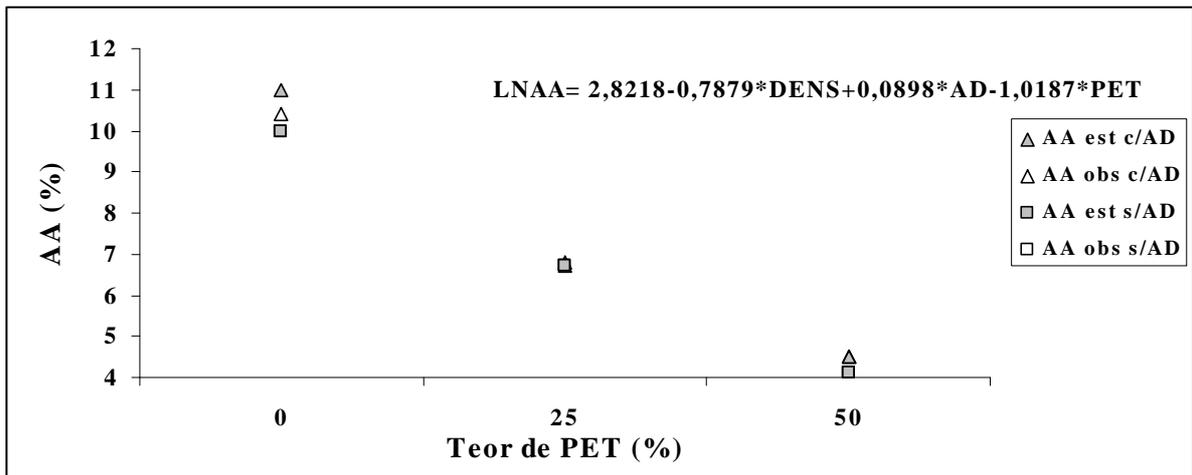


Figura 20- Média dos valores observados e estimados para adsorção de vapor de água (AA) em função do conteúdo de PET aditivado ou não.

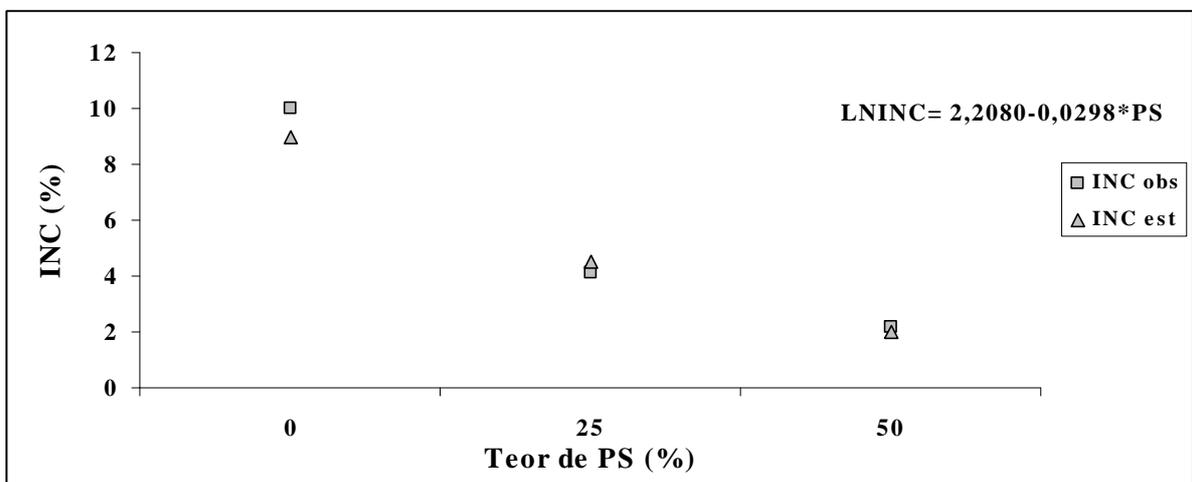


Figura 21- Média dos valores observados e estimados para o inchamento em espessura (INC) em função dos teores de PS.

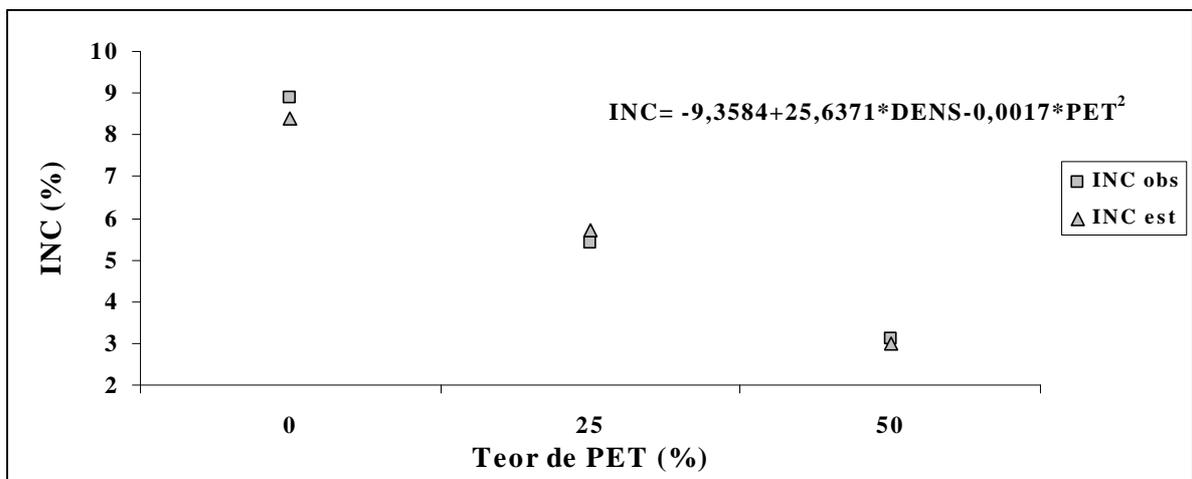


Figura 22- Média dos valores observados e estimados para o inchamento em espessura (INC) em função dos teores de PET.

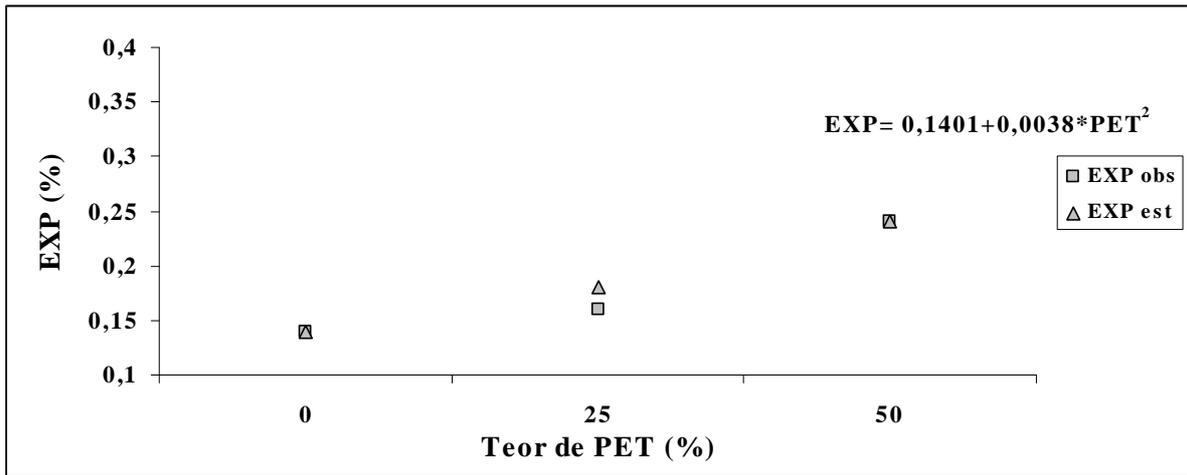


Figura 23- Média dos valores observados e estimados para expansão linear em função do conteúdo de PET, para uma densidade de $0,64 \text{ g/cm}^3$.

5. CONCLUSÕES

Em geral, para as propriedades mecânicas, as chapas mais resistentes foram aquelas fabricadas apenas com partículas de madeira (T1) ou com 25% de PS (T5) e 50% de PS aditivado (T4), e as chapas menos resistentes foram fabricadas com 50% de PET aditivado ou não e submetido ao ultrassom e microondas (T12 e T14).

O aditivo não interfere nas propriedades de resistência mecânica de chapas fabricadas com PET submetido ao ultrassom e microondas.

Para as propriedades mecânicas, ao comparar todos os tratamentos, as chapas que superaram o valor mínimo exigido pela norma foram aquelas fabricadas com 100% de PM (T1) ou 25% e 50% de PS aditivado (T4 e T5).

Em geral, as chapas mais estáveis, dimensionalmente, foram aquelas fabricadas com 50% de PS aditivado ou não (T4 e T6). E as chapas com menor estabilidade dimensional foram aquelas fabricadas com 50% de PET aditivado ou não e submetido ao ultrassom e microondas (T12 e T14).

A análise dos tratamentos por regressão indicou que a inclusão do PET e PS permitiu a produção de chapas com maior estabilidade dimensional, por causa, dentre outros fatores, da característica hidrofóbica dos plásticos. Em contrapartida, a inclusão do PET e PS diminuiu a resistência mecânica, das chapas devido, principalmente, à baixa quantidade de aditivo utilizado e a falta de uniformidade na geometria das partículas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANUÁRIO BRASILEIRO DO PLÁSTICO. **Plástico Moderno.** São Paulo, 2002.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 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.**

BOEGLIN, N.; TRIBOULOT, P.; MASSON, D. **A Feasibility study on boards from wood and plastic waste: bending properties, dimensional stability and recycling of the board.** *Holz als Roh -und Werkstoff*, 55(1997):13-16. 1997. Springer – Verlag.

BÜHRER, E.N. **Química e Tecnologia dos Plásticos.** Imprensa da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1996. 127p

CLEMONS, C. **Plastic-Wood Composites in the United States.** *Forest Products Journal*, V.52. nº.611, p.10-18, 2002.

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.

- FURTADO, M.R. Aplicações novas prometem dobrar o uso de reciclados. **Plástico Moderno**, n.266, 1996.
- HALLIGAN, A.F. A review of thickness swelling in particleboard. Spring Verlad. 1970. **Wood Science and Techonoly**. v.4, p.301-312, 1970.
- COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM, CEMPRE. Lixo municipal In: Manual de gerenciamento integrado. São Paulo: s.ed., 278p. 1996.
- 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).
- KELLY, M.W. Critical Literature Review of Relation-Ships Between Processing Parameters and Phisical Properties of Particleboard. USDA Forest Service **General Technical Reports**, FPL, v.10, 1977. 65p.
- KOKTA, B.V.; DANEULT, C.; BESHAY, A. Use of grafted aspen fibers intermoplastic composites: V. Effect of extreme conditions on mechanical properties of polyethylene composites. **Polymer Composites**, v.7, n.5, 1986.
- KRISHNAN, M.; NARAYAN, R. Compatibilization of biomass fiber with hydrophobic materials. **Mat. Res. Soc. Symp. Proc.**, v.266, 1992. 93p.
- LEHMANN, W.F. Properties of structural particleboards. **Forest Products Journal**, v.24, n.1, p.19-26. 1974.
- LIANG, B.H.; MOTT, L.; SHALER, S.M.; CANEBA, G. Properties of transfermolded wood-fiber/Polystyrene composities. **Wood and Fiber Science**, v.26, n.3, p.383-389, 1994.
- LUCAS, E.F. **Síntese de polímeros**. Apostila: Cursos Abertos ABPol, 1994.
- MACIEL, A.S. **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de *Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis* em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato**. Viçosa: UFV, 2001. 116 p. (Tese de Doutorado em Ciência Florestal).
- MANO, E.B.; BONELLI, C.M.C. A reciclagem de plásticos pós-consumidos. **Revista de Química Industrial**, n.698, p.18-22, 1994.
- MOSLEMI, A.A. **Particleboard**. Carbandale: Southern Illinóis University Press, 1974, v.1. 243p.

- ROWELL, R. M. *et al.* **Utilization of natural fibers in plastic composites: Problems and Opportunities.** Lignocellulosic – Plastics Composites, p. 23-51, 1997.
- SEAN, S.Y.T.; SANSCHAGRIN, B.; KOKTA, B.V.; MALDAS, D. Effect of treated wood fiber-polystyrene composites under prolonged immersion in water. **Mokusai Gakkaishi**, v.36, n.8, p.637-643, 1990.
- 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.
- YOUNGQUIST, J. A. The marriage of wood and non-wood materials. **Forest Products Journal**, 45(10):25-30, 1995. Madison-WI.
- ZU, J. Z. WU, Q., JR, H.S., Mc Nabb. Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: A review of coupling agents and treatments. **Wood and Fiber Science**, 32(1), p. 888-104, 2000.