

ESTUDO DE MISTURAS DE HDPE E SERRAGEM DE CEDRO PARA OBTENÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA

Fernanda Abbate dos Santos

Dissertação em Ciência e Tecnologia de Polímeros, submetida ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências MSc, em Ciência e Tecnologia de Polímeros, sob orientação da Professora Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e co-orientação do Professor Leonardo Bresciani Canto

Rio de Janeiro

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dissertação de Mestrado: Estudo de misturas de HDPE e serragem de cedro para obtenção de madeira plástica

Autor: Fernanda Abbate dos Santos

Orientador: Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco

Co-orientador: Leonardo Bresciani Canto

Data da defesa: 27 de agosto de 2008

Aprovada por:

Professora Élen Beatriz Acorde Vasques Pacheco, DSc
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA / UFRJ
Orientadora/Presidente da Banca Examinadora

Professor Leonardo Bresciani Canto, DSc
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA / UFRJ
Co-orientador

Professora Maria Inês Bruno Tavares, DSc
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA / UFRJ

Professora Marcia Christina Amorim Moreira Leite, DSc
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Professora Mônica Regina Marques Palermo de Aguiar, DSc
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Rio de Janeiro

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Fernanda Abbate dos.

Estudo de misturas de HDPE e serragem de cedro para obtenção de madeira plástica / Fernanda Abbate dos Santos. – Rio de Janeiro, 2008.
xv, 105 fl.:il.;

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA, 2008.

Orientador: Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco.

Co-orientador: Leonardo Bresciani Canto.

1. HDPE. 2. Resíduo de madeira 3. Compósitos plástico-madeira. 4. Reciclagem. 5. Madeira plástica. I. Pacheco, Élen Beatriz Acordi Vasques (Orient.). II. Canto, Leonardo Bresciani, (Co-orient.) III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano. IV. Título.

Esta Dissertação de Mestrado foi desenvolvida nos Laboratórios do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA) da Universidade Federal do Rio Janeiro (UFRJ), com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior (CAPES).

CRÉDITOS

Ao apoio financeiro dado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Agradeço a Deus pôr me fortalecer e ajudar a
vencer todas as adversidades.

**“O SENHOR é a minha luz e a minha salvação; a
quem temerei? O SENHOR é a força da minha
vida; de quem me recearei?.”**

Salmos 27:1

Dedico essa dissertação ao meu filho Matheus por seu amor e apoio, os quais foram fundamentais para que eu concluísse mais uma etapa da minha vida.

“Meu filho, te amo muitíssimo”.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Dr^a. Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Dr. Leonardo Bresciani Canto, pela orientação e auxílio com a Dissertação.

Às professoras Márcia Christina Amorim Moreira Leite, Mônica Regina Marques Palermo de Aguiar e Maria Inês Bruno Tavares por terem aceitado o convite para participar da banca Examinadora.

Aos professores do IMA, que muito contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico.

Aos meus familiares, em especial a minha mãe Selma Abbate e minha tia Vera Lúcia Abbate, por todo apoio.

Aos meus amigos Walter Abuid, Tatiana Carvalho, Fabíola Saraiva por toda a paciência, amor e amizade.

Às amigas do IMA: Roberta Magalhães, Érica da Cruz, Luciana Portal, Rogéria, M^a do Socorro e Jaciene, por conselhos e por todo seu apoio.

Aos funcionários do IMA: Alice, Arceu, Bárbara, Beatriz, Glória, Jairo, Léa, Márcia e a toda equipe da biblioteca, Nadir, Valquíria, Vitor, Sr. Wilson e a todos aqueles sempre se mostraram prestativos.

Resumo da Dissertação apresentada no Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (MSc), em Ciência e Tecnologia de Polímeros.

ESTUDO DE MISTURAS DE HDPE E SERRAGEM DE CEDRO PARA OBTENÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA

Orientadora: Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco

Co-orientador: Leonardo Bresciani Canto

O objetivo deste trabalho foi verificar a possibilidade de utilização de resíduo de madeira de cedro, como agente de reforço para compósitos à base de HDPE. Os compósitos de HDPE e resíduo de cedro foram obtidos em uma extrusora com dupla rosca co-rotacional inter-penetrante, pelo método pre-dry split feed, o qual se utiliza da farinha de madeira pré-seca e alimentação do polímero em separado. Os compósitos foram obtidos sem e com a adição de agentes de acoplamento (10% em massa) - copolímeros à base de etileno com teores diferentes de anidrido maleico - e com diferentes teores de resíduos de madeira na forma de farinha (10, 20 e 30% em massa). A avaliação das propriedades dos compósitos foi realizada através de ensaios de corpos de prova injetados a partir de material extrusado. Os compósitos foram avaliados quanto às suas propriedades mecânicas sob tração e flexão, e dureza. Os compósitos foram submetidos também à análise morfológica em microscópio eletrônico de varredura (MEV). O comportamento térmico dos compósitos foi avaliado por calorimetria diferencial de varredura (DSC). Os resultados mostraram que a incorporação de madeira no HDPE produz ganhos, de maneira geral, nas propriedades mecânicas dos compósitos, em especial nos módulos elásticos sob flexão e tração. A resistência à tração e o alongamento na ruptura diminuíram com o aumento do teor de farinha de madeira. O uso dos agentes de acoplamento conferiu melhores propriedades mecânicas nos materiais. Os compósitos contendo agente de acoplamento com maior teor de anidrido maleico (3% em massa) apresentaram melhores desempenhos mecânico. Análises em DSC

mostraram que a cristalização do HDPE nos compósitos não é afetada pela presença da farinha de madeira. A análise dos materiais por MEV mostrou que houve uma melhor adesão interfacial nos compósitos contendo agente de acoplamento, melhorando as propriedades mecânicas dos compósitos. Contudo, foi possível obter ganhos significativos nas propriedades mecânicas do HDPE somente com a adição de farinha de madeira.

Rio de Janeiro

2008

Abstract of Dissertation presented to Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano of Universidade Federal do Rio de Janeiro, as partial fulfillment of the requirement for the degree of Master in Science (MSc), Science and Technology of Polymers.

STUDY OF CEDAR SAWDUST AND HDPE MIXTURES FOR THE OBTAINMENT OF PLASTIC LUMBER

Advisor: Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco

Co-advisor: Leonardo Bresciani Canto

The objective of this study was to verify the possibility of use of cedar wood flour as reinforcement agent for HDPE based composites. HDPE-cedar flour composites were prepared in an intermeshing co-rotating twin-screw extruder using pre-dry split feed method. The composites were obtained with and without the addition of polyethylene-graft-maleic anhydride (10 wt%) as coupling agents and with different amounts of cedar wood flour (10, 20 and 30 wt%). Specimens for mechanical tests were injection-molded from the extruded material. Mechanical properties of composites, tensile and flexural properties and hardness, were evaluated. The morphologies of composites were analyzed in a scanning electron microscope (SEM). Thermal analyses of composites were evaluated by differential scanning calorimetry (DSC). The mechanical tests showed that the incorporation of cedar flour into HDPE enhances significantly the stiffness but decrease slightly the tensile strength and elongation at break. Composite mechanical properties were improved with the use of coupling agents. Composites containing coupling agent with higher level of maleic anhydride (3% by weight) had better mechanical performance. DSC analysis showed that crystallization of HDPE in composites was practically not affected by the presence of cedar wood flour. The analysis of composites by SEM showed that there was a better interfacial adhesion in composites containing coupling agent. However, it was possible to make significant improvements in the mechanical properties of HDPE only with the incorporation of cedar wood flour.

Rio de Janeiro

2008

Parte desta Dissertação de Mestrado foi apresentada no seguinte congresso:

“Utilização de Resíduos de Madeira na Obtenção de Madeira Plástica”, Fernanda Abbate dos Santos, Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Leonardo Bresciani Canto, IV Encontro Nacional de Química Ambiental, 2008, Aracaju – SE, Brasil.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	01
2 - OBJETIVOS	03
2.1 - OBJETIVO GERAL	03
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	03
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1 - RECICLAGEM	04
3.1.1 - Reciclagem do Plástico	06
3.1.2 - Reciclagem da Madeira	10
3.2 - MADEIRA PLÁSTICA	13
3.2.1 - Histórico	15
3.2.2 - Propriedades Gerais	21
3.2.3 - Propriedades Mecânicas da Madeira Plástica Reforçada com Resíduo de Madeira	24
3.3 - PRESENÇA DE AGENTES COMPATIBILIZANTES EM SUA FORMULAÇÃO	26
3.4 - PROCESSAMENTO	30
3.4.1 - Efeito das Características da Carga Celulósica no Processamento de WPCS	32
3.4.2 - Processos Modernos de Obtenção da Madeira Plástica	33
4 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	37
4.1 - MATERIAIS	38
4.1.1 - Polietileno de alta densidade (HDPE)	38
4.1.2 - Farinha de Madeira (WF)	39
4.1.3 - Agentes de Acoplamento	40
4.1.4 - Reagentes	41

4.2 - EQUIPAMENTOS	41
4.3 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS	42
4.3.1 - Determinação do Teor de Lignina	42
4.3.2 - Teor de Umidade	43
4.3.3 - Densidade	44
4.3.4 - Determinação do Tamanho das Partículas	44
4.3.4.1 - Peneiramento da Serragem	45
4.3.4.2 - Microscopia Ótica	45
4.3.5 - Análise Termogravimétrica	46
4.3.6 - Obtenção dos Compósitos	46
4.3.6.1 - Preparação da Serragem	46
4.3.6.2 - Processamento	47
4.3.6.3 - Injeção dos Corpos de Prova	51
4.3.7 - Ensaio de Resistência à Tração	51
4.3.8 - Ensaio de Resistência à Flexão	51
4.3.9 - Dureza	51
4.3.10 - Microscopia Eletrônica de Varredura	52
4.3.11 - Calorimetria Diferencial de Varredura	52
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1-CARACTERIZAÇÃO DA SERRAGEM	53
5.1.1 - Determinação do Tamanho das Partículas	53
5.1.2 - Avaliação do Teor de Lignina	56
5.1.3 - Teor de Umidade	57
5.1.4 - Densidade	57
5.1.5 - Análise Termogravimétrica	58
5.2 - OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS	61

5.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS	64
5.3.1- Propriedades sob Tração	65
5.3.1.1 - Módulo sob Tração	65
5.3.1.2 - Resistência à Tração	68
5.3.1.3 - Alongamento na Ruptura	72
5.3.2- Propriedades sob Flexão	74
5.3.2.1 - Módulo de Elasticidade sob flexão	74
5.3.2.2 - Resistência à Flexão	76
5.3.3- Dureza	77
5.4 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	79
5.5 - CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	82
5.6 - RESUMO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS	85
5.7 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DE MADEIRAS PLÁSTICAS COMERCIAIS E AS DOS COMPÓSITOS WPC	86
6 - CONCLUSÕES	88
7 - SUGESTÕES	89
8 - REFERÊNCIAS	90

1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente geração de resíduos poliméricos de origem industrial ou doméstica tem sido a causa de muitos problemas ambientais. A preocupação com a destinação desses resíduos e com o impacto causado por eles ao meio-ambiente é uma das principais inquietações da sociedade, da indústria e de centros de pesquisa (GUADAGNINI, 2001).

No setor madeireiro, a grande quantidade de resíduos gerados também tem sido motivo para preocupações. Atualmente, cada vez mais os resíduos vêm despertando o interesse de pesquisadores e empresários, principalmente para verificar as possibilidades de reutilização desses materiais (YAMAJI, 2004a).

Entre as alternativas viáveis para solucionar o problema do acúmulo do lixo polimérico está a utilização de plásticos reciclados na produção de madeira plástica que visa substituir a madeira natural em suas aplicações (GUADAGNINI, 2001).

A madeira plástica é um material que pode ser obtido a partir de diferentes resinas poliméricas pós-consumo (LAMPO, 1997). Além disso, em sua composição podem ser utilizados diversos tipos de carga, entre os quais destaca-se o resíduo de madeira (LAMPO, 1997).

Uma das vantagens na utilização de compósitos poliméricos a base de fibra de madeira, também conhecidos como wood-plastic composites (WPC), para a obtenção da madeira plástica é o fato de constituírem uma melhor alternativa do ponto de vista ambiental e econômico para o decréscimo de resíduos da indústria madeireira, os quais merecem especial atenção por serem materiais de baixa densidade, exigindo maior espaço para a estocagem (MATTOSO, 1999; YAMAJI, 2004a).

O uso dos compósitos plástico-madeira está crescendo rapidamente o que ocorre devido às vantagens que apresentam em relação à madeira natural, como não rachar, não empenar, exigir pouca ou nenhuma manutenção e ser facilmente moldado em formas complexas (BRANDT, 2003).

Para o futuro, espera-se o aumento do uso do compósito plástico-madeira, pois, dependendo da formulação, podem-se obter produtos com propriedades superiores ao plástico e à própria madeira (KOENIG, 2002).

2 - OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho foi obter compósitos à base de HDPE e de resíduo de madeira de cedro, visando sua utilização como madeira plástica.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Avaliar o efeito de diferentes porcentagens de resíduos de cedro nas propriedades dos compósitos;
- Estudar a influência da adição de copolímeros de etileno-anidrido maleico nas propriedades dos compósitos produzidos através da extrusão;
- Avaliar as propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas dos compósitos HDPE e pó de madeira;
- Comparar as propriedades dos compósitos obtidos com as de madeiras plásticas comerciais.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A grande procura por madeira de boa qualidade para ser aplicada na obtenção de mobiliário, decoração de interiores e na construção civil tem-se traduzido na exploração extensiva de florestas. Nesse contexto, surge a necessidade urgente de encontrar um substituto adequado para a madeira (CUI, 2008).

Os compósitos plástico-madeira têm-se mostrado bons substitutos para madeira natural em muitas aplicações. Esses materiais têm sido utilizados na obtenção de móveis, pisos, deques e em outros produtos de forma satisfatória.

Esses compósitos já são produzidos industrialmente em diversas partes do mundo, mas ainda precisam de confiança do mercado brasileiro, devido ao fato de ser um produto relativamente novo e por admitir composições diversas. Não existe ainda no Brasil tal produto sintético largamente utilizado na indústria moveleira ou construção civil (HILLIG, 2006).

Aspectos como a escolha da matriz polimérica, do resíduo de madeira e do tipo de processamento são cruciais na determinação das propriedades da madeira plástica tipo WPC.

O efeito da interação plástico-madeira, dos agentes compatibilizantes e dos processos de fabricação nas propriedades mecânicas dos compósitos plástico-madeira são fatores que devem ser investigados para se compreender de modo mais aprofundado como as características da madeira (espécie, tamanho das partículas, conteúdo de extrativos e o teor de umidade entre outras) influenciam na qualidade dos compósitos (YAMAJI, 2004b).

3.1 - RECICLAGEM

A crescente geração de resíduos sólidos traz consigo a necessidade imperativa de uma destinação final ou tratamento adequado para esses rejeitos.

A disposição desses resíduos apresenta problemas relacionados a sua locação, espaço físico ocupado pelos rejeitos e, também, à proliferação de doenças que podem atingir parte da população que mora próximo ao local de descarte e sobrevive da comercialização desses resíduos (SANTOS, 2004).

No Brasil, são gerados anualmente cerca de 2,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos das quais apenas 600 mil toneladas recebem tratamento adequado, conforme dados da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento, Recuperação e Disposição de Resíduos Especiais (ABETRE) (IETEC, 2008).

As formas mais usuais para destinação de resíduos sólidos no Brasil são os lixões e aterros. Contudo, essas alternativas não têm se mostrado como solução mais adequada para solucionar a questão do destino desses resíduos (ROLIM, 2000).

Nos países desenvolvidos, principalmente na Europa, existem problemas nítidos relacionados ao espaço físico para alocação de rejeitos. Em alguns países, os resíduos sólidos são transportados por longas distâncias até alcançar sua destinação final (SANTOS, 2004).

O adequado gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos torna-se necessário, com o objetivo de evitar ou minimizar os impactos negativos à saúde e ao meio ambiente, como também manter aspectos estéticos e de bem estar para a população, contribuindo para um desenvolvimento sustentável (ROLIM, 2000).

A reciclagem surge, então, como uma alternativa de tratamento dos resíduos sólidos. Essa alternativa permite o reaproveitamento dos resíduos como matéria-prima, reincorporando-os ao processo produtivo, reduzindo o impacto ambiental negativo (ROLIM, 2000).

A reciclagem pode ser classificada como sendo a revalorização dos descartes domésticos e industriais, através uma série de operações. Constitui uma atividade que alia consciência ecológica ao desenvolvimento econômico e tecnológico (COMPAM, 2008).

Alem de contribuir para não esgotar a capacidade dos aterros sanitários, a reciclagem auxilia na preservação de recursos naturais, na redução do consumo de energia e para educação e conscientização ambiental da população.

3.1.1 - Reciclagem do Plástico

Uma das grandes vantagens da reciclagem de plásticos é a economia na utilização de petróleo para a obtenção desses materiais. Assim, além de reduzir o acúmulo de lixo polimérico, reduz o uso de petróleo com a finalidade de produzir polímeros sintéticos.

A forma mais comum de reciclagem dos plásticos é a chamada reciclagem mecânica que consiste na reutilização de resíduos para obtenção de outro artefato plástico, através de reprocessamento em equipamentos industriais de transformação de plásticos (MANO, 2005). Esse tipo de reciclagem se aplica a materiais termoplásticos, que podem ser moldados com aquecimento e que após o resfriamento podem ser novamente moldados (MANO, 2005).

A reciclagem mecânica pode ser realizada com material pré-consumo (reciclagem primária) ou pós-consumo (reciclagem secundária) (MANO, 2005).

Normalmente, esses resíduos pré-consumo são limpos e de fácil identificação, não contaminados por partículas ou substâncias estranhas a conversão (COMPAM, 2008). Os materiais que se inserem na classe pós-consumo provêm de lixões, sistemas de coleta seletiva. São constituídos pelos mais diferentes tipos de material e resina, o que exige uma separação para permitir seu aproveitamento (COMPAM, 2008).

Existem outras formas de reciclagem ainda não muito difundidas no Brasil: a reciclagem química ou terciária e a reciclagem energética ou quaternária (MANO, 2005).

A reciclagem química transforma os refugos plásticos em produtos químicos úteis. Visa obter os compostos químicos que deram origem aos plásticos (monômeros) ou compostos químicos de baixo peso molecular (oligômeros) que são obtidos a partir

de reações químicas, pela quebra parcial ou total das moléculas dos resíduos plásticos, selecionados e limpos (MANO, 2005). Esse tipo de reciclagem se aplica tanto a termoplásticos como termorrígidos.

Com a reciclagem energética há recuperação da energia contida nos plásticos através de processos térmicos (SIMPESC, 2008). A reciclagem energética distingue-se da incineração por utilizar os resíduos plásticos como combustível na geração de energia elétrica. Já a simples incineração não reaproveita a energia dos materiais (SIMPESC, 2008). Assim como a reciclagem química, a reciclagem energética se aplica a termoplásticos e a termorrígidos.

No Brasil, a forma de reciclagem mais utilizada é a mecânica, devido a fatores como custo de mão-de-obra, baixo investimento para instalação de uma planta de reciclagem, grande volume de polímero pós-consumo, etc (FORLIN 2002). Já em países da Europa e no Japão as formas de reciclagem química e a energética são bastante utilizadas (SPINACÉ, 2005).

A reciclagem mecânica vem crescendo em volume e aumentando a diversidade e qualidade dos produtos, devido à otimização dos processos (SPINACÉ, 2005).

Outro fator que tem colaborado para o aumento da reciclagem mecânica é a presença de uma classe de trabalhadores de baixa renda no Brasil que pratica a atividade de coleta de resíduos recicláveis (PLASTIVIDA, 2008). Segundo dados levantados pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE) o número de municípios que operam programa de coleta seletiva aumentou de 135 no ano de 1999 para 405 no ano de 2008 (CEMPRE.ORG.BR, 2008). Além disso, os resíduos plásticos constituem o segundo material reciclável mais presente na composição do lixo nas coletas seletivas (Figura 1).

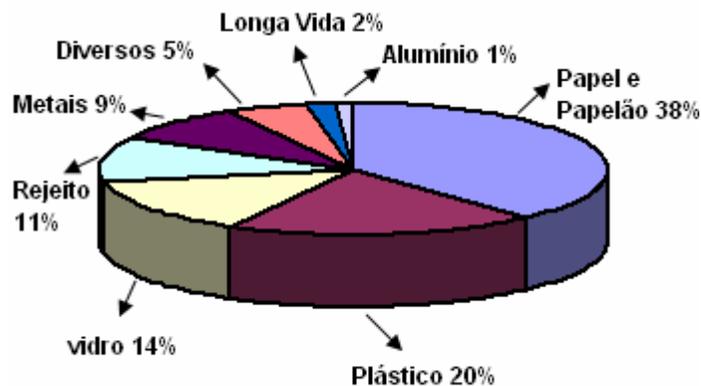


Figura 1: Composição média do lixo na coleta seletiva (% em peso) nas cidades com coleta seletiva (PLASTIVIDA, 2008)

Esse crescimento colocou o Brasil como um país com elevado índice de reciclagem mecânica (Figura 2) quando comparado a muitos países da Europa.

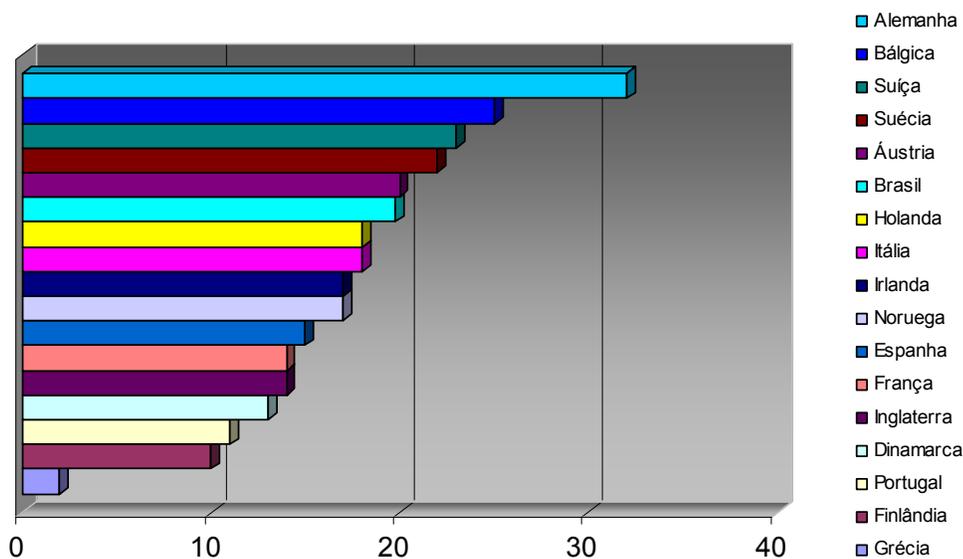


Figura 2: Taxa de reciclagem mecânica (%) de países da Europa (ano-base 2005) e do Brasil (ano-base 2006) (PLASTIVIDA, 2008)

Embora a reciclagem represente uma boa solução no que se refere ao acúmulo de polímeros no meio ambiente, existem algumas desvantagens ou dificuldades na realização da reciclagem em alguns casos, as quais muitas vezes tornam a reciclagem menos atrativa ou até mesmo impossibilita sua realização.

Um dos maiores problemas na reciclagem é a presença de contaminantes, materiais como aço, alumínio, vidro, tintas, papel e resíduos de alimentos entre outros. Os resíduos industriais caracterizam-se por uma maior uniformidade de materiais e as embalagens pós-consumo apresentam um elevado nível de contaminação orgânica, além da heterogeneidade de materiais (YAMAJI, 2004b).

Existe ainda, uma série de outros fatores que dificultam a realização da reciclagem tais como a variação considerável no preço de compra dos materiais, a falta de fornecimento contínuo e homogêneo de matéria-prima, a falta de treinamento dos catadores. Além disso, a ausência do código de identificação das resinas em muitos produtos de acordo com a norma ABNT NBR 13.230 dificulta a separação dos diferentes tipos de plásticos, recorrendo-se, dessa forma, às diferenças das características físicas e de degradação térmica (PLASTIVIDA, 2007).

Apesar de todas estas dificuldades expostas, a reciclagem é válida. Driblando-se todos os problemas já mencionados é possível fazer da reciclagem um negócio lucrativo e que traga benefícios ao meio-ambiente. A prova disso está na existência de indústrias recicladoras de plásticos, as quais vêm operando no mercado com sucesso (PLASTIVIDA, 2007). O Quadro 1 mostra o faturamento obtido com a reciclagem mecânica em cada região do Brasil.

Quadro 1: Faturamento Obtido com a Reciclagem Mecânica (PLASTIVIDA, 2008)

FATURAMENTO POR REGIÃO			
Região	Faturamento Bruto		Faturamento por Tonelada Produzida
	(R\$)	%	(R\$/Ton)
Centro-oeste	15.117.477	0,9	989
Nordeste	139.517.812	8,6	1.421
Norte	12.147.095	0,7	2.165
Sudeste	924.282.534	56,9	2.061
Sul	583.387.269	35,9	2.676
BRASIL	1.624.983.459	100	2.131

A região do Brasil campeã na reciclagem de plásticos pós-consumo é a Sudeste com 59%, onde concentra-se o maior número de municípios com programa de coleta seletiva, seguida pela região Sul com 28% e pela região Nordeste com 13% (PLASTIVIDA, 2008).

3.1.2 - Reciclagem da Madeira

Apesar da grande preocupação em relação ao destino final de plásticos, resíduos de outras atividades como a do ramo madeireiro também vem afetando o meio ambiente pelo grande volume de resíduos gerados. Na indústria da madeira, uma grande quantidade de resíduos de madeira é gerada em diferentes fases de processamento da madeira (ADHIKARY, 2007).

De acordo com dados levantados por Olandoski (2001), todo processo de transformação da madeira conduz à geração de resíduos, ficando o aproveitamento da tora entre 40 a 60% do seu volume total.

As perdas em volume por formação de resíduos em cada fase de produção de uma indústria de compensados segundo Brand e colaboradores (2002) é de 6,5% na esquadrejadeira e 9,1% na calibradora-lixadeira. Segundo Olandoski (2001), ocorre 8,7% de perda em volume na esquadrejadeira e de 8,6% nas calibradoras-lixadeiras.

Olandoski (2001) ressalta que as fontes de resíduos no processo de fabricação de compensados estão atreladas à qualidade das lâminas de madeira, ao processo produtivo como um todo, às características do equipamento e ao comprometimento do operador com o trabalho. Ainda segundo Olandoski (2001), na produção de chapas compensadas, as lâminas de madeira de boa qualidade geram menos resíduos que produtos de madeiras de qualidade inferior, chegando a quase 20% de diferença.

De acordo com Arima e colaboradores (1999), nas cercas de 2500 serrarias existentes na região da Amazônia, ocorre geração de um volume de resíduo de madeira estimado entre 60 e 68% do volume de madeira bruta processada. De acordo com os autores, a baixa produtividade deve-se ao equipamento obsoleto, formas

inadequadas de armazenar toras e a falta generalizada de atividades que visem o aproveitamento de aparas de madeira.

Esses resíduos, apesar de considerados de baixo nível poluidor, apresentam problemas na sua estocagem e sua queima a céu aberto ou em queimadores sem fim energético libera gases para o meio ambiente tornando-os potenciais poluidores (LIMA, 2005).

Uma solução para o acúmulo dos resíduos de madeira seria a sua utilização ambientalmente correta, o que faria com que os resíduos deixassem de ser um problema e passassem a ser um subproduto, podendo até gerar lucro. De acordo com Olandoski (2001), o preço pago pelo resíduo depende do tipo e do teor de umidade.

Apesar da maioria das empresas madeireiras ter a serragem como resíduo, em algumas empresas, a serragem produzida é comercializada, sendo então o produto final. A garantia da qualidade é que faz a diferença entre a o resíduo de serragem e o produto serragem, uma vez que este atende a especificações técnicas de granulometria, teor de umidade, espécie de madeira, cor, além da garantia de fornecimento contínuo (YAMAJI, 2004b).

A reciclagem dos resíduos de madeira tem sido favorecida pelo aumento das obrigações quanto ao manejo dos resíduos que permitiram o desenvolvimento de novos produtos reciclados (BOEGLIN, 1997).

Entretanto, sabe-se que o processo da reciclagem não é tão simples. De acordo com Falk (1997), apesar da viabilidade da reciclagem desses resíduos, existem alguns obstáculos técnicos e econômicos, tais como o custo do transporte dos resíduos, teor de umidade dos resíduos, mistura de espécies, a contaminação do material por agentes químicos entre outros.

Apesar de todas as dificuldades, a reciclagem é uma forma importante de aproveitamento dos resíduos de madeira. É uma prática ambientalmente desejável e, desta forma, os resíduos das atividades florestais também devem ser transformados em produtos através de processos de reciclagem práticos e econômicos (YAMAJI, 2004).

Lima e Silva (2005) destacam algumas aplicações que podem ser dadas aos resíduos de madeira, tais como geração de energia, produção de chapas e partículas

finas, utilização como polpa para produção de papel e como carga em compósitos poliméricos.

Durante muitas décadas, a utilização mais comum desses resíduos da madeira tem sido como combustível para caldeiras, porém, muitas vezes os resíduos são simplesmente queimados a céu aberto (FALK, 1997).

A geração de energia por resíduos deve ser realizada com tratamento de efluentes gasosos e os resíduos usados para este fim não devem possuir nenhum aditivo químico para se evitar a emissão de poluentes (LIMA, 2005).

Uma aplicação mais recente dos resíduos de madeira está na produção de aglomerados e *Medium Density Fiberboard* (MDF). A indústria de chapas aglomeradas surgiu para o melhor aproveitamento de madeiras menos nobres e resíduos (LIMA, 2005). As principais fontes de matérias-primas utilizadas pelas fábricas de madeira aglomerada são resíduos industriais e de exploração florestal, madeiras de qualidade inferior não industrializáveis de outra forma, madeira proveniente de florestas plantadas e reciclagem de madeira sem serventia (ABREU, 2005). No Brasil, a madeira de florestas plantadas, especialmente de eucaliptos e pinus, constitui a fonte mais importante de matérias-primas.

De acordo com Chipanski (2006), os EUA utilizam os resíduos de madeira como fonte principal de matéria-prima na indústria de aglomerados, em contraste com o Brasil que utiliza no máximo 15%.

A madeira aglomerada possui múltiplas aplicações, entre as quais destaca-se a fabricação de móveis, tampos de mesas, laterais de portas e armários, divisórias, laterais de estantes e, de forma secundária, produtos para a indústria de construção civil (ABREU, 2005).

É importante ressaltar que para utilização dos resíduos na indústria de chapas aglomeradas, devem ser observadas questões com relação ao tamanho das partículas utilizadas, que devem ser adequadas para o processo, influenciando diretamente a qualidade do produto (LIMA, 2005).

Uma outra utilização dos resíduos de madeira é como polpa para produção de papel. Porém, existem algumas limitações quanto ao tipo de resíduo a ser usado e a origem da madeira, pois são fatores que podem influenciar diretamente na qualidade do produto final (LIMA, 2005).

Em alguns países, restos de madeira procedentes de clareamento de madeiras tratadas são usadas na fabricação de pasta de papel, processo pouco comum no Brasil, devido a facilidade climática de obtenção de matéria prima pelo reflorestamento (REMADE, 2003).

Uma forma alternativa para aplicação dos resíduos de madeira é sob a forma de carga em compostos poliméricos. Segundo Banks (2003), o uso dos resíduos de madeira como aditivo de polímeros termoplásticos é bastante viável e possui diversas aplicações.

Dentre esses produtos, de acordo com Stark e colaboradores (1997), os compósitos plástico-madeira estão se tornando o material mais importante dentro da reciclagem de resíduos da indústria madeireira.

3.2 - MADEIRA PLÁSTICA

Segundo a definição dada pela *American Society for testing and Materials* (ASTM) (2001), a expressão madeira plástica (*plastic lumber*) aplica-se a produtos manufaturados com conteúdo de plástico superior a 50% em massa, que possuem genericamente seção transversal retangular, apresentam dimensões típicas dos produtos de madeira industrializada. Apesar dessa definição dada pela ASTM, podem-se obter também artefatos de madeira plástica com seção transversal circular ou em outros formatos.

A grande maioria de produtos de madeira plástica no mercado são feitos de polietileno, sendo utilizado principalmente o polietileno de alta densidade (HDPE). Contudo, a madeira plástica pode ser obtida a partir de outras resinas como o polipropileno, poliestireno e o poli(cloreto de vinila) ou, até mesmo, pela mistura de

diferentes resíduos plásticos (LAMPO, 1997). Existem também formulações de madeira plástica as quais são acrescentadas cargas naturais, como a serragem de madeira, as cargas minerais, a fibra de vidro.

Em sua composição, além de cargas, também podem ser adicionados lubrificantes, estabilizantes, modificadores de impacto, corantes, pigmentos, biocidas e outros aditivos visando à modificação de suas características físico-mecânicas (AMIN, 2006).

Além da influência da composição, as condições de processamento também são grandemente responsáveis pelas características finais dos produtos de madeira plástica.

Fatores como propriedades do material a ser processado, a forma como o resíduo plástico chega à etapa de processamento, a presença de componentes adicionais e a umidade do material conduzem à necessidade de equipamentos com características técnicas altamente específicas em relação a extrusoras utilizadas no processamento de polímeros virgens (GUADAGNINI, 2001). Entre essas características específicas encontram-se a redução no tempo de residência do plástico no interior do equipamento quando sob altas temperaturas e cisalhamento. Nesse caso, sugere-se o uso de uma velocidade baixa de rotação do parafuso para redução do desgaste da unidade de plastificação. Para a obtenção de um produto final de boa qualidade, também são necessárias a constância da velocidade de alimentação como função da resistência enfrentada pela extrusora, uma boa degaseificação e homogeneização do material (GUADAGNINI, 2001).

A madeira plástica pode ser trabalhada com as ferramentas convencionais de carpintaria, podendo ser aplainada, serrada, aparafusada e pregada como a madeira natural (AMIN, 2006; EPIC, 2003). Além disso, apresenta vantagens sobre a madeira natural como grande impermeabilidade, elevada resistência à deterioração, ao mofo e a cupins e não requer pintura ou manutenção regulares, permitindo sua utilização em ambientes nos quais a madeira natural não resiste por longos períodos de tempo, como locais úmidos ou submersos em água, tais como na estrutura de diques em áreas costeiras (AMIN, 2006; LAMPO, 1997).

Por apresentar procedência natural, a madeira de origem celulósica pode gerar peças com uma série de defeitos estruturais como nós, fendas, arqueaduras, furos de larvas, bolores, etc, além de apresentar imperfeições decorrentes das diferenças de umidade e da secagem, o que exerce grande influência na resistência final das peças e têm controle relativamente difícil (GUADAGNINI, 2001).

Entre uma série de benefícios frente à madeira natural em muitas aplicações, a grande vantagem da madeira plástica é poder ser feita a partir de materiais proveniente da reciclagem de frascos, garrafas, copos descartáveis, embalagens e outros produtos de rápido descarte, auxiliando, portanto, na minimização do problema do acúmulo de material plástico.

Além disso, sua utilização também tem o objetivo de proteger as florestas evitando que novas árvores sejam derrubadas para construção de móveis, como banco de jardim, mesa de varanda, móveis, deques, cercas e píeres (AMIN, 2006).

3.2.1 - Histórico

Os registros mais antigos do uso da madeira plástica datam do início de 1970, quando as técnicas de processamento do material foram desenvolvidas na Europa e no Japão (LAMPO, 1997). A madeira plástica feita por esses processos era constituída principalmente de “sucata plástica” pós-industrial, sendo a única fonte de plástico a baixo custo disponível naquele tempo. Entretanto, a indústria de madeira plástica não experimentou um crescimento significativo no Japão ou Europa naquela ocasião (LAMPO, 2000).

Ainda na década de 70, Eduard Klobbie da Holanda começou a desenvolver um sistema para processar resíduos de plásticos transformando-os em um artigo com as mesmas propriedades de trabalho e de processamento da madeira natural (KLOBBIE, 1974). O sistema de Klobbie consiste em uma extrusora com longos e lineares moldes de grande seção transversal montados sobre uma pequena torre rotante e um tanque de água refrigerada (EHRIG, 1992; LAMPO, 1997).

Durante o processamento, o material polimérico é amolecido e misturado na extrusora e forçado a entrar em um dos moldes (CED.USC.EDU, 2006; EHIG, 1992; LAMPO, 1997). Após o preenchimento do molde, a torre gira permitindo que um outro molde seja preenchido (CED.USC.EDU, 2006; EHIG, 1992; LAMPO, 1997). O molde cheio gira em um tanque da água resfriada permitindo seu resfriamento, sendo, então, ejetado (EHIG, 1992). Esse processo, também conhecido como intrusão, baseia-se na combinação dos processos de injeção e extrusão convencionais e foi o pioneiro na manipulação de misturas de resíduos plásticos (EHIG, 1992; LAMPO, 1997). O processo é caracterizado por apresentar elevado rendimento, tolerar altas taxas de contaminantes e ter a habilidade de produzir moldes com paredes grossas e perfis lineares (CED.USC.EDU, 2006).

A partir dos anos 80, algumas empresas como a *Advanced Recycling Technology* (Bélgica), *Hammer's Plastic Recycling* (Estados Unidos) e *Superwood* (Irlanda) produziram equipamentos baseados no sistema Klobbie, porém com algumas variações (EHIG, 1992).

A máquina produzida pela *Advanced Recycling Technology*, chamada de ET/1 (*Extruder Technology 1*), consiste em uma extrusora adiabática, capaz de processar muitos tipos de misturas de plásticos com diferentes densidades e contaminantes (EHIG, 1992). A ET/1 foi projetada para aceitar no máximo entre 30 e 40% de contaminação (EHIG, 1992). Por esse processo é possível obter postes, varas, estacas, mourões, pranchas, sarrafos, etc.

O processo utilizado pela *Hammer's Plastic Recycling*, provavelmente o maior produtor de madeira plástica, produz peças de parede espessa, como comedouros de animais, suportes de bancos e também perfis lineares, tipo tábuas.

No final da década de 80, os processos de obtenção da madeira plástica foram considerados por peritos em reciclagem como uma possível alternativa ao descarte de resíduos plásticos gerados principalmente por embalagens recicláveis (LAMPO, 2000). A necessidade econômica e logística de reduzir a quantidade desses materiais descartados passou a dirigir a viabilidade comercial desta nova indústria nos Estados Unidos (LAMPO, 1997).

Depois do sistema de Klobbie, outros processos foram desenvolvidos visando processar resíduos de materiais plásticos. Um desses processos é a extrusão contínua que é uma variação do método anterior e que consiste na extrusão do material em matrizes resfriadas, tal como na moldagem contínua de dutos corrugados (EHRIG, 1992; LAMPO, 1997).

Um dos processos mais recentes de fabricação de produtos com larga seção transversal a partir de resíduos plásticos patenteado nos Estados Unidos foi desenvolvido pela Mitsubishi Petrochemical e recebeu o nome de processo Reverzer (EHRIG, 1992; LAMPO, 1997). Nesse processo, os resíduos de plástico são amolecidos em um funil e então misturados por uma rosca para desenvolver uma mistura bem uniforme dos resíduos fundidos. Esse processo não é limitado a formas lineares como os outros dois processos, é muito versátil e aceita uma diversidade de contaminantes; porém, não foi um sucesso comercial.

Outro processo que pode ser utilizado na fabricação da madeira plástica é a moldagem por compressão. A tecnologia mais bem sucedida para moldagem por compressão de resíduos plásticos foi desenvolvida na Alemanha por Erich Weichenreider e é chamada de Recycloplast (EHRIG, 1992; LAMPO, 1997). É empregada em plantas de grandes dimensões, com altos investimentos. O processo é capaz de produzir peças de parede grossa, como paletes, bancos, grades etc.

Algumas das primeiras aplicações da madeira plástica foram em artigos tradicionalmente feitos de madeira como mesas de piquenique, bancos de parque, tampas de lixeira, aplicações em produtos usados ao ar livre (LAMPO, 1997). Posteriormente, o uso da madeira plástica em deques em substituição a madeira tratada ganhou também popularidade (EPIC, 2003).

Durante a década de noventa, surgiram algumas tecnologias visando à utilização de plásticos reciclados em produtos projetados para substituir a madeira em deques e cercas por produtos de madeira plástica reciclada (RPL), incluindo extrusões de polímero puro e compósitos com fibra de madeira (WPC) (EPIC, 2003). Ainda no início da década de noventa, pesquisa em reciclagem de plásticos foi iniciada no IMA, sob a orientação da professora Eloisa Biasoto Mano, apresentando um caráter pioneiro no

Brasil, uma vez que foi a primeira linha de pesquisa regular na área, em nível universitário. Naquele momento, foram geradas duas teses de Mestrado no assunto, defendidas em 1993.

Os compósitos com fibra de madeira, que atualmente representam o segmento com maior e mais rápido crescimento do mercado de madeira plástica, tiveram no início da sua utilização alguns empecilhos ao seu desenvolvimento. Essas barreiras consistiam na falta de conhecimento sobre a madeira por parte do setor de plásticos e na distância existente entre os dois ramos, por processarem os materiais de modo distinto e com poucos equipamentos em comum (YOUNGQUIST, 1995). Esses fatores fizeram com que tentativas iniciais de se fazer compósitos plástico-madeira fracassaram, fazendo com que essa combinação ficasse desacreditada por algum tempo (CLEMONS, 2002).

Com os avanços nas pesquisas sobre esses compósitos, novas tecnologias de processamento foram surgindo, aumentando a viabilidade da utilização da madeira plástica tipo WPC.

Ainda no início dos anos 90, a Itália desenvolveu um sistema no qual a secagem da madeira era feita na própria extrusora através de duas saídas de gases, sendo uma com sistema de vácuo. Esta tecnologia continua sendo utilizada em algumas fábricas nos Estados Unidos (SCHUT, 1999).

Ainda no início dessa década, os Estados Unidos apresentaram um novo processo no qual a alimentação da madeira e dos polímeros era feita em separado não exigindo a pré-mistura (CLEMONS, 2002).

No ano de 1995, foi desenvolvida a primeira madeira para uso marinho, obtida a partir de polímeros reforçados com fibras de madeira, pela Universidade do Maine, nos Estados Unidos (DAGHER, 2001). Atualmente a madeira plástica tem sido empregada na substituição da madeira natural tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA) em aplicações em ambientes marinhos. A RPL é preferida à madeira tratada com CCA, pois além de suas propriedades como resistência ao apodrecimento e elevada durabilidade, é também mais favorável do ponto de vista da preservação ambiental pelo fato de não ser usando produto químico perigoso na sua produção (BRESLIN, 1998).

A partir de 1996, as indústrias americanas começaram a produzir os granulados de plástico-madeira para fornecer aos diversos fabricantes de produtos a base de compósitos plástico-madeira (CLEMONS, 2002).

De acordo com Youngquist (1995), Falk (1997) e Laverty (2002), durante os anos 90, os Estados Unidos fizeram grandes avanços na área de compósitos de madeira. Atualmente, o maior crescimento do mercado de madeira plástica concentrou-se no mercado norte-americano de deques residenciais, avaliado em 5,2 bilhões de dólares por ano (EPIC, 2003).

Além da produção de deques, fabricantes norte-americanos estão procurando introduzir WPC em outras áreas de produtos de construção, tais como cercas, janelas e lâminas de para substituir a madeira compensada. O uso de WPC também está sendo considerado para produção de telhados e tapumes (MARKARIAN, 2005). As Figuras 3 e 4 mostram exemplos da utilização de WPCs.



Figura 3: Deque residencial de WPC (Caulfield, 2005)



Figura 4: Telhado de WPC (Caulfield, 2005)

Apesar do desenvolvimento de tecnologias para obtenção da madeira plástica reciclada (RPL) a falta de padrões foi uma barreira em particular para seu uso no início dos anos 90 pela indústria de construção, especialmente em aplicações estruturais (EPIC, 2003; KRISHNASWAMY, 2001).

Esta lacuna tem sido dirigida pela *Plastic Lumber Trade Association* (PLTA). A associação tem trabalhado para estabelecer um conjunto de padrões ASTM que se aplicam à madeira plástica feita, a princípio, de polietileno de alta densidade (EPIC, 2003). A indústria que trabalha com misturas de HDPE e fibra de madeira também utiliza os padrões ASTM. O desenvolvimento de padrões referentes às propriedades da madeira plástica dará suporte ao crescimento futuro em aplicações não-estruturais (KRISHNASWAMY, 2001; EPIC, 2003).

Com o crescimento do mercado, a indústria da madeira plástica tem procurado ativamente por novos produtos, aplicações e tecnologias de processamento, o que tem conduzido ao desenvolvimento de um número de novos produtos oferecendo melhores propriedades (EPIC, 2003).

3.2.2 - Propriedades Gerais

Embora fabricada em tamanhos dimensionais típicos, a madeira plástica apresenta propriedades físicas e mecânicas que são muito diferentes daquelas apresentadas por peças de madeira apresentando as mesmas dimensões (LAMPO, 1997). Uma das diferenças mais óbvias é a rigidez muito mais baixa (módulo de elasticidade) da madeira plástica. O pinho e o carvalho têm tipicamente módulo pelo menos de $6,9 \times 10^6$ kPa, que é superior ao módulo da madeira plástica sem carga de reforço. Geralmente o módulo da madeira plástica é pelo menos uma ordem de valor mais baixa do que aquela exibida pela madeira natural (LAMPO, 2000).

Todas as madeiras plásticas sintéticas têm o grave inconveniente de serem pouco resistentes ao calor e à chama, ao contrário do que acontece com a madeira natural, de lenta combustão. Além disso, a madeira plástica torna-se muito quente quando exposta diretamente à luz do sol e não esfria rapidamente. Tal problema pode ser minimizado com a colocação de uma abertura pequena entre as tábuas adjacentes, permitindo, assim, algum movimento de ar em torno das tábuas e gerando um “efeito refrigerador” (LAMPO, 1997).

A madeira plástica é viscoelástica em termos de suas propriedades reológicas. As propriedades mecânicas são dependentes do tempo e da temperatura a que o esforço está submetido. O material também é sujeito à deformação permanente sob cargas sustentadas (*creep*) (LAMPO, 2000). A taxa de cedência depende do valor da tensão, da duração da tensão e da temperatura em que a tensão é aplicada. Além disso, as mudanças dimensionais devido à temperatura são maiores na madeira plástica do que na madeira natural (LAMPO, 2000).

Essas diferenças fazem com que a madeira plástica não seja geralmente apropriada para a substituição direta da madeira natural com dimensões similares às do material sintético, uma vez que pode produzir estruturas que apresentem deflexões inaceitáveis quando submetidas a uma determinada carga ou que cederão com tempo devido ao seu próprio peso (CARROLL, 2001; LAMPO, 1997).

Carroll e colaboradores (2001) avaliaram a deflexão de amostras de madeira plástica quando submetidas à carga e à temperatura elevada, simulando condições de verão. Em seus estudos foram incluídos também testes mecânicos simulando condições de temperatura de inverno (-23.3°C) e de verão (40.6°C).

Os resultados dos testes em condições de temperatura de inverno mostraram que a madeira plástica apresenta propriedades de tração, compressão e flexão comparáveis as da madeira natural (22,5; 4,52 e 3,59 GPa para os módulos de compressão, de flexão e de tração respectivamente). Entretanto, os testes simulando condições de verão mostraram que a madeira plástica apresenta uma resistência menor do que a madeira natural, embora aceitável. Esses resultados mostram que as medidas das peças da madeira plástica devem ser maiores do que peças correspondentes de madeira natural para compensar essas diferenças de valores (CARROLL, 2001).

Para os testes que simulam condições do verão, a madeira plástica apresentou valores de módulo menores que os da madeira natural (5,79; 1,03 e 1,12 GPa para os módulos de compressão, de flexão e de tração respectivamente). O módulo baixo aumenta as deflexões dentro da estrutura quando é submetida a cargas.

Isso pode ser verificado em algumas aplicações em deques. Devido a pouca rigidez das tábuas de madeira plástica, observa-se a propensão a ceder sob seu próprio peso. Se a extensão das tábuas for demasiadamente grande, as distâncias entre as vigas de sustentação devem ser diminuídas e (ou) serem usadas tábuas mais espessas em comparação àquelas nas quais o deque é feito de madeira natural (LAMPO, 2000).

Na maioria de casos, as aplicações mal sucedidas da madeira plástica devem-se à falta de compreensão das diferenças entre suas propriedades mecânicas e as da madeira natural, bem como das variações dessas propriedades ao longo do tempo (LAMPO, 1997).

Breslin e colaboradores (1998) pesquisaram as variações nas propriedades de engenharia a longo prazo da madeira plástica reciclada obtida a partir de HDPE com 20% de fibra de vidro usada na construção de um píer. Os resultados da avaliação da

estabilidade dimensional mostraram que não houve variação significativa das dimensões da amostra.

A dureza também não apresentou mudança significativa ao longo do tempo. Porém, a dureza da superfície exposta da seção transversal apresentou medidas individuais que variaram consideravelmente ao longo da superfície (22 ± 16 a 36 ± 9 na escala Shore D). Segundo os autores, esse fato ocorreu devido à estrutura interna porosa da madeira plástica que se torna mais densa em direção à superfície. Portanto, devido ao fato do núcleo poroso apresentar propriedades diferentes da superfície externa, a madeira plástica deve ser sempre testada em diversos pontos internos e externos para se obter resultados conclusivos (CARROL, 2001).

Os valores do módulo de compressão não apresentaram diferença significativa até o décimo nono mês (24 Mpa na seção transversal). Entretanto, no último mês, os valores aumentaram consideravelmente. Já o módulo de flexão mostrou um elevado grau de variação entre os valores encontrados para as amostras duplicadas dos perfis de madeira plástica, com um valor inicial de 1860 Pa e final de 2120 Pa, chegando a diminuir 50% durante os meses de verão (Breslin, 1998).

Embora o módulo de flexão medido no sentido da seção transversal não tivesse apresentado grandes variações entre o valor inicial e o encontrado no décimo nono mês, uma variação considerável foi medida ao longo do tempo. A maior variação ocorreu nos meses do verão (BRESLIN, 1998).

Segundo Breslin e colaboradores (1998), as mudanças nas medidas do módulo de flexão da seção transversal pode ser reflexo preferencialmente da heterogeneidade do material do que de uma mudança nas propriedades iniciais da madeira plástica devido ao desgaste por exposição ambiental. Os autores também atribuem o aumento no módulo de flexão e de compressão ocorrido no último mês de análise como decorrência da mudança do equipamento de leitura das análises.

Grandes variações no módulo de flexão devem ser consideradas na projeção de estruturas construídas usando perfis de madeira plástica.

3.2.3 - Propriedades Mecânicas da Madeira Plástica Reforçada com Resíduo de Madeira

Uma questão crítica em relação à madeira plástica é sua baixa rigidez e resistência à flexão quando comparada com a madeira natural. Isto limita o uso da madeira plástica em aplicações estruturais, tais como colunas de sustentação de deques. A maior parte da madeira plástica utilizada na construção de deques é utilizada em suas superfícies onde o módulo de flexão é menos crítico (EPIC, 2003).

Para modificar as propriedades físicas e mecânicas dos produtos de madeira plástica e assim garantir um maior número de aplicações e com melhores resultados, têm-se utilizados uma série de composições distintas dentre as quais destacam-se aquelas que apresentam fibra de madeira como um de seus componentes. Uma das vantagens desses compósitos é o fato de constituem uma alternativa para os resíduos da indústria madeireira (YAMAJI, 2004a). Além disso, a utilização de fibras vegetais em compósitos poliméricos confere vantagens como a melhoria do desempenho mecânico de plásticos convencionais e o menor custo (MATTOSO, 1999; THOMAS, 2002, BISMARCK, 2006).

A fibra de madeira tem ainda a função de aumentar a rigidez dos compósitos, melhorar as propriedades de usinabilidade, além de ter um custo menor que a resina (SCHUT, 1999).

Um estudo sobre o aumento do teor de fibra de madeira em compósitos de polipropileno, polietileno e poliestireno mostrou que o aumento do teor da carga promove um aumento no módulo de flexão e uma diminuição na resistência à tração (CPIA, 2003). Apesar desse benefício, estudos mostram que a carga de madeira diminui muito a resistência ao impacto dos compósitos de plástico e madeira (CUI, 2008; KARMARKAR, 2007; SOLÍS, 2005).

Além da influência do teor da carga, um estudo realizado por Maiti e Singh (1986) mostra que as propriedades dos compósitos também são influenciadas pelo tamanho das partículas. Os autores examinaram diferentes tamanhos de partículas de serragem de madeira e sua influência em compósitos com HDPE, sem o uso de

agentes de acoplamento. Amostras foram extrusadas e submetidas a ensaios de tração. Os resultados mostraram um decréscimo na resistência à tração com aumento do tamanho da partícula da carga de 180 para 425 μm . Resultado que os autores atribuem a uma adesão fraca entre os componentes, desde que nenhum agente de acoplamento foi utilizado.

Stark e Rowlands (2003) estudaram os efeitos de diferentes tamanhos de partículas de serragem de madeira nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno e madeira. As propriedades desses compósitos foram também comparadas às propriedades de compósitos reforçados com fibras de madeira obtidas por desfibrilamento termomecânico. Os autores concluíram que a razão de aspecto, ou seja, a relação comprimento/diâmetro da partícula, tem um grande efeito nas propriedades de resistência e na dureza dos compósitos, enquanto que o tamanho da partícula não apresenta uma influência tão pronunciada nessas propriedades.

A espécie de madeira utilizada também influencia nas propriedades dos compósitos, como mostra um estudo realizado por Wolcott (2003). O autor usou duas formulações de serragem, HDPE, aditivos e lubrificantes, variando entre uma formulação e outra apenas a espécie de serragem de madeira (*Pinus sp.* e *Pseudotsuga menziesii*). Os compósitos foram processados de modo idêntico. Os compósitos produzidos com *Pseudotsuga menziesii* apresentaram valores de módulo de elasticidade em flexão estática e módulo de ruptura em flexão estática 78% e 76%, respectivamente, dos valores apresentados pelos compósitos com *Pinus sp.* Os autores consideram essa desigualdade na resistência à flexão, devida a diferença na interação entre madeira e plástico, sugerindo que a espécie de madeira deve ter uma significativa influência na estrutura do produto final e, em consequência, nas suas propriedades. A fibra de madeira tem ainda substituído de modo eficiente cargas tradicionalmente utilizadas em compósitos poliméricos, como as cargas minerais e fibra de vidro.

Diversos autores citam que as fibras naturais, como a de madeira, apresentam vantagens sobre as cargas minerais e a fibra de vidro como cargas de reforço em compósitos poliméricos (HONG 2008; HRISTOV, 2004; LEE, 2004; NACHTIGALL, 2007; SCHEINEIDER, 1995; YANG, 2007). Entre as vantagens estão a menor abrasão

do equipamento processador, menor peso do produto final, menor custo, maior abundância e maior valor da propriedade estudada em relação ao peso.

Vianna e Colaboradores (2004) estudaram os efeitos do tipo de poliestireno de alto impacto nas propriedades de compósitos termoplásticos com farinha de resíduo de madeira e concluíram que a farinha de madeira pode ser utilizada eficientemente na substituição de cargas minerais e de fibra de vidro, principalmente devido à sua baixa densidade e o melhor desempenho em termos de resistência e rigidez específica. Foi ressaltado também que o balanço das propriedades de rigidez e impacto se mostraram independentes da morfologia das partículas nas composições que foram investigadas. Embora os autores tenham alertado que a substituição de cargas minerais por reforços celulósicos ainda exige estudos mais aprofundados, verificou-se que os compósitos produzidos apresentaram boas propriedades mecânicas.

Wambua e colaboradores (2003) produziram compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira e encontraram valores das propriedades mecânicas próximos aos encontrados na literatura para compósitos de PP reforçados com fibra de vidro.

Devido à crescente utilização e importância dos WPCs, diversos autores (CARROL, 2001; CUI, 2008; FARUK, 2007; ICHAZO, 2001; JAYARAMAN, 2004; PANTHAPULAKKAL, 2007; SELKE, 2004; YANG, 2005) têm estudado os efeitos da adição de fibra de madeira nas propriedades da madeira plástica.

Outras cargas têm sido pesquisadas para utilização em compósitos com plástico, principalmente as de origem natural como sisal, juta, cânhamo, fibra de casca de arroz e de coco (AMIN, 2006; HONG, 2008; LI, 2008; XU, 2008; YAO, 2008; WAMBUA, 2003).

3.3 - PRESENÇA DE AGENTES COMPATIBILIZANTES EM SUA FORMULAÇÃO

Misturas de poliolefinas com carga de madeira são incompatíveis devido ao fato do termoplástico ser apolar e a celulose apresentar caráter polar. Essa

incompatibilidade conduz a uma adesão interfacial fraca. A interface tem um papel decisivo nas propriedades mecânicas do compósito, pois é responsável pela transferência de tensões da matriz polimérica para a fibra de madeira (PASQUINI, 2008; YAMAJI, 2004b). A falta de afinidade entre polímero e madeira acaba por comprometer o reforço do compósito devido à transferência ineficiente de esforços na interface (HONG, 2008). Além disso, pode favorecer a degradação dos compósitos causada pela umidade e por ataque de microrganismos (ORDEN, 2007).

Para melhorar a adesão interfacial torna-se necessária a compatibilização do sistema através da incorporação dos chamados agentes de acoplamento ou de adesão interfacial (CAULFIELD, 2005; CORREA, 2003).

Um dos efeitos do compatibilizante é reduzir a tensão interfacial entre a fase dispersa e a matriz, apresentando um efeito emulsificante, facilitando a dispersão de uma fase na outra. A redução da tensão interfacial conduz ao aumento da adesão pelo aumento da interação entre os contornos das fases facilitando a transferência de tensões e, além disso, atua na estabilização da fase dispersa evitando a sua coalescência (ABDELLAH, 1996). Do ponto de vista mecânico, os agentes compatibilizantes atuam no sentido de evitar o processo de delaminação da fibra na matriz polimérica (JOSEPH, 2000).

Inicialmente o compatibilizante ou agente de acoplamento, em contato com a superfície da carga de reforço, deve interagir fortemente com as fibras através de ligações covalentes fortes ou interações secundárias do tipo ácido-base ou ligações hidrogênio (CORREA, 2003). Conseqüentemente, o compatibilizante deve conter uma quantidade suficiente de grupos funcionais que possibilitem a reação com as hidroxilas da celulose. Outro aspecto considerado tem sido o comprimento das cadeias do compatibilizante que devem possuir cadeias suficientemente longas de alta massa molecular que permitam a formação de emaranhamentos moleculares com a matriz polimérica na interfase através de ancoramento mecânico (CORREA, 2003). Alguns autores relacionam o tratamento superficial da fibra como forma de otimização do processo de compatibilização (COUTINHO, 1999; KAZAYAWOKO, 1999).

Segundo George e colaboradores (2001), a qualidade da interface fibra-matriz é significativa para a aplicação de fibras naturais como reforço para plásticos. Uma vez que as fases são quimicamente diferentes, é necessária uma adesão muito forte e bem distribuída na interface para haver a transferência das tensões.

Caraschi e Leão (2002) prepararam compósitos com 15, 25 e 40% de farinha de madeira. O aumento no percentual de madeira nos compósitos promoveu um decréscimo nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os autores concluíram que esse comportamento está relacionado com a baixa resistência na interface fibra-matriz e que a incorporação de um agente compatibilizante torna-se necessária quando uma maior resistência mecânica é requerida para o produto final.

Diversos autores citam como agentes de acoplamento mais utilizados aqueles à base de anidrido maleico e ácido acrílico (BEG, 2006; BLEDZKI, 2005; CANTERO, 2003; CORREA, 2003; HRISTOV, 2004; LI, 2003, LU, 2005; QIU, 2003; SOMBATSOMPOP, 2005).

O polipropileno graftizado com anidrido maleico (MAPP) ou polietileno graftizado com anidrido maleico (MAPE) são exemplos de agentes compatibilizantes que têm recebido atenção devido à melhoria nas propriedades mecânicas (resistência à flexão e tração) que proporcionam aos compósitos de poliolefinas/fibras celulósicas (CORREA, 2003; JOSEPH, 2002; QIU, 2005). Isso é atribuído a sua capacidade de impregnação e dispersão na fibra de forma eficiente.

Kim e colaboradores (1998) utilizaram o MAPP como agente compatibilizante. O percentual de pó de madeira utilizado foi de 50% em peso e até 15% de agente compatibilizante. Os autores puderam observar um aumento na resistência à tração com a adição do agente compatibilizante, contudo a resistência ao impacto não se alterou.

Keener e colaboradores (2004) relatam que o uso de 3% em massa de MAPE em WPCs chega a dobrar a resistência à tração e triplicar as propriedades de impacto dos compósitos, quando comparado àqueles nos quais nenhum agente compatibilizante foi utilizado.

Isocianatos, silanos e peróxido de benzoíla também têm sido usados como agentes compatibilizantes. O uso desses produtos apresenta influência comprovada na melhoria das propriedades dos compósitos (HILLIG, 2006).

Karmarkar e colaboradores (2007) estudaram um compatibilizante que foi preparado por graftização de m-isopropenil- α,α -dimetilbenzil-isocianato (m-TMI) em polipropileno. As misturas foram preparadas com 5% p/p de m-TMI-PP e com teores de fibra de madeira entre 10-40% p/p. Os resultados mostraram um aumento nas propriedades de flexão e de tração com o aumento do teor de madeira. Os compósitos sem compatibilizante com teor de madeira até aproximadamente 30% tiveram os valores de resistência à flexão e à tração aumentados, porém, para teores de madeira maiores, os valores dessas propriedades diminuíram. Os autores atribuem esse comportamento à melhora na interação e adesão entre a fibra e a matriz polimérica que conduz melhor a transferência de tensão para a fibra.

Para a resistência ao impacto desses compósitos, os autores relataram que essa propriedade diminuiu com o aumento do teor de madeira, mesmo nos compósitos com compatibilizante.

Bengtsson e Oksman (2006) realizaram estudos sobre os efeitos do uso do silano nas propriedades mecânicas de compósitos de HDPE e fibra de madeira. Os compósitos com ligações cruzadas mostraram uma resistência à flexão superior aos materiais a que nenhum silano foi adicionado.

A melhora na resistência à flexão é causada provavelmente pela maior adesão entre a madeira e o polímero. Os autores atribuem a melhora na adesão à ligação covalente entre a madeira e o polietileno através de reação de condensação ou de formação de radical livre que conduziria à formação de ligações cruzadas (Bengtsson, 2006). Além disso, a ligação do hidrogênio entre os grupos silanol enxertados no polietileno e os grupos hidroxila da madeira, bem como por forças de van der Waals entre o silano condensado na madeira e a matriz do polietileno, podem melhorar a adesão entre as fases.

Nachtigall e colaboradores (2007) estudaram um novo agente compatibilizante polimérico (polipropileno modificado com um organosilano) em compósitos de

polipropileno e farinha de madeira. Nesse estudo, foram encontrados o valor de 23 MPa para resistência à tração do polímero puro e de 15 MPa para o compósito contendo 30% em massa em madeira. Os autores observaram que a carga de madeira não teve atuação reforçativa no compósito sem compatibilizante. O compósito com mesmo teor de madeira e com compatibilizante apresentou resistência à tração de 28 MPa. Os autores atribuíram esse comportamento ao aumento da adesão interfacial entre os componentes, como esperado.

Além dos aspectos químicos ligados a compatibilização da fibra com a matriz, o desempenho do compósito ainda depende de outros fatores como a quantidade de carga, distribuição granulométrica das fibras, distribuição das fibras na matriz entre outros (CORREA, 2003; RABELLO, 2000).

3.4 - PROCESSAMENTO

Embora existam diferentes composições de madeira plástica, atualmente o mercado americano divide-se entre empresas que produzem a madeira plástica a partir de HDPE expandido e aquelas que utilizam compósitos de plástico e fibra de madeira (EPIC, 2003). Os produtos de WPC correspondem a aproximadamente 80% da madeira plástica produzida, enquanto o setor de polímero puro é responsável por cerca de 20 % (EPIC, 2003). Esse fato tem contribuído para um maior interesse na busca por tecnologias para o processamento de compósitos de plástico com fibra de madeira.

A maioria dos WPCs é manufaturada em extrusora, onde o material derretido é forçado através de uma matriz para obter um perfil contínuo na forma desejada (Figura 5) (CAULFIELD, 2005; STARK, 2007). A extrusão presta-se a processar misturas de WPC fundido com elevada viscosidade e a dar forma aos longos e contínuos perfis comuns aos materiais de construção (CAULFIELD, 2005). Os perfis podem ter uma forma sólida simples ou altamente projetada e oca.

Os compósitos de plástico e fibra de madeira têm sido manufacturados em extrusoras do tipo mono-roscas, dupla-roca cônicas e paralelas, contra e co-rotantes e extrusoras em série.

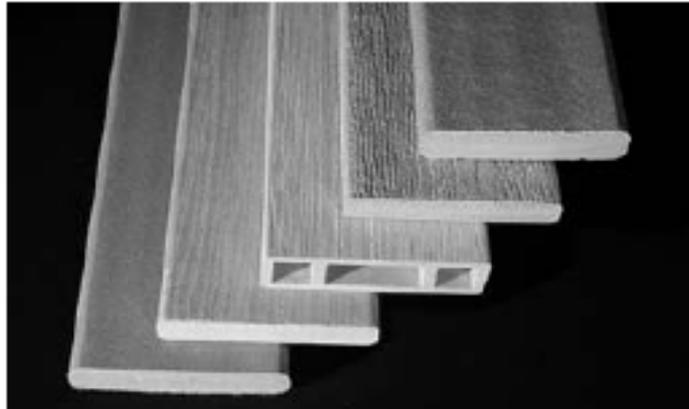


Figura 5: Exemplos de perfis de madeira plástica (CAULFIELD, 2005)

Embora a extrusão seja o método de processamento mais comum para WPCs, os processadores usam uma variedade de tipos de extrusora e de estratégias de processando (MAPLESTON 2001 apud CAULFIELD, 2005). Alguns processadores utilizam extrusoras mono-roscas para dar a forma final (CAULFIELD, 2005). Outros combinam e extrusam formas finais em uma etapa usando extrusoras com dupla-roca. Alguns processadores usam diversas extrusoras em série, uma para proporcionar homogeneização da mistura e as outras para conformação (MAPLESTON 2001 apud CAULFIELD, 2005). A configuração do processo é projetada especificamente para agregar a fibra de madeira e dispersá-la eficazmente e uniformemente no polímero (EPIC, 2003).

Além da extrusão, outras tecnologias de processamento tais como o moldagem por injeção e por compressão também são utilizadas para produzir WPCs, mas a porcentagem total de material produzido para esses tipos de processamento é muito menor (ENGLISH, 1996). Esses dois últimos métodos têm vantagens quando o

processamento de uma peça contínua não é desejado. A formulação do compósito deve ser ajustada para estar de acordo com as exigências do processamento. Por exemplo, a viscosidade baixa necessitada para a moldagem por injeção pode limitar o teor de fibra de madeira na formulação (CAULFIELD, 2005). Peritos da indústria de WPC afirmam que o potencial da moldagem por injeção é enorme (MARKARIAN, 2003). A moldagem por injeção pode produzir formas complexas cujas aplicações crescentes incluem produtos como telhas e tapumes.

3.4.1 - Efeito das Características da Carga Celulósica no Processamento de WPCS

Inúmeros aspectos devem ser observados no processamento de termoplásticos com resíduos de madeira. A umidade e a granulometria devem ser rigidamente controladas para evitar descontinuidades de processo e peças com características inaceitáveis devido à presença de bolhas ou manchas superficiais causadas por processos termo-oxidativos (STARK, 1997). Assim, como principal requisito, o resíduo celulósico deve ser pré-secado e zonas de degasagem devem ser utilizadas para remoção da umidade residual durante o processamento. Um dos fatores afetados diretamente pelo teor de umidade do reforço lignocelulósico é a produtividade da linha de extrusão: quanto maiores os teores de umidade das partículas, menor a produtividade por conta do maior tempo de residência necessário para devolatilização do compósito (RODOLFO, 2006). Conseqüentemente, com uma maior permanência dentro da extrusora, o material torna-se mais suscetível à degradação devido à ação da temperatura e cisalhamento (RODOLFO, 2006).

A absorção de umidade pela madeira é devido ao caráter hidrofílico da celulose, característica que resulta num enfraquecimento na interface de adesão entre a madeira hidrofílica e a matriz polimérica hidrofóbica. Isso afeta também a dispersão das fibras que tendem a formar aglomerados por ligações de hidrogênio que aumentam ainda mais o nível de absorção de umidade. A alta absorção de umidade de fibras vegetais leva ao inchamento e à presença de vazios (porosidade) na interface do material,

resultando em propriedades mecânicas pobres e na instabilidade dimensional do compósito (ASHORI, 2008). Entretanto, métodos físicos e químicos através do uso de compatibilizantes e aditivos permitem contornar algumas dessas dificuldades (CANTERO, 2003).

Adicionalmente, a baixa temperatura de degradação da celulose na faixa de 200 a 220 °C constitui um fator limitante do processo, exceto quando os tempos de residência são minimizados. A exposição do resíduo de madeira a temperaturas acima dessa faixa libera compostos voláteis, provoca descoloração, aparecimento de odor e a fragilização do compósito, obtendo-se um produto poroso com baixa densidade e propriedades mecânicas inferiores (ENGLISH, 1996, ASHORI, 2008).

Segundo Kollmann e Côté (1984), para temperaturas até 150 °C as reações químicas da madeira podem ser consideradas insignificantes, havendo apenas a liberação de vapor de água. Entre 150 e 200 °C há a formação de gases e um escurecimento da madeira e temperaturas acima de 200 °C começam a degradá-la.

Isso tem restringido o uso de termoplásticos em WPCs às principais resinas comerciais, como poliolefinas, plásticos estirênicos e PVC, que podem ser processadas em temperaturas abaixo da temperatura de degradação da celulose (CAULFIELD, 2005; PASQUINI, 2008).

3.4.2 - Processos Modernos de Obtenção da Madeira Plástica

Com base nessas peculiaridades, existe atualmente uma grande discussão entre os maiores fabricantes de equipamentos tais como Bauzzano, Davis-Standard, Leistritz, Millacron Inc., Krupp Werner & Pfeleiderer, etc., sobre a melhor configuração de máquina para processamento de compósitos termoplásticos com madeira (CORREA, 2003). Estes equipamentos podem ser classificados em quatro categorias distintas.

No processo que utiliza a madeira e mistura pré-homogeneizada (*Pre-dry; Pre-mix*) são utilizados equipamentos no qual a fibra de madeira é submetida a processos de pré-secagem em níveis de umidade inferiores a 1% e alimentada em uma extrusora rosca-dupla contra-rotacional juntamente com o polímero, normalmente na forma de pó

(CORREA, 2003). A mistura polímero-madeira e aditivos é preparada em misturadores intensivos do tipo Henschel antes de ser alimentada na extrusora (JOBWERX, 2003; CORREA, 2003). A mistura pulverizada de madeira e polímero pode então ser alimentada em uma extrusora usando um dispositivo de alimentação Crammer (JOBWERX, 2003). Sistemas com dupla-rosca contra-rotante, por causa da distribuição estreita de tempos de residência do material no sistema e da geração limitada da energia térmica, são usados principalmente para a conversão do PVC devido a sua instabilidade térmica (STASIEK, 1997).

No processo que utiliza a madeira pré-seca e a alimentação polímero-madeira em separado (*Pre-dry; Split Feed*), a resina e a fibra são alimentadas em separado propiciando um melhor controle do tempo de residência da carga celulósica durante o processamento (CORREA, 2003). Nesse processamento são normalmente utilizadas extrusoras de dupla-rosca de grande capacidade, com alimentadores laterais, onde a fibra é misturada ao polímero fundido, passando por zonas de mistura distributiva e degaseificação da umidade residual.

Um terceiro processo utiliza a madeira úmida e o polímero fundido (*Wood First; Melt Feed*). Para a realização do processamento são necessárias duas extrusoras que operam simultaneamente; uma extrusora primária secando a farinha de madeira e uma outra menor plastificando o polímero e os aditivos (CORREA, 2003).

A empresa Davis-Standard dos EUA patenteou um equipamento dedicado para o processamento de compósitos termoplásticos com essas características, denominado *Woodtruder*[®] com capacidade de até 1000 lbs/h (PLÁSTICO MODERNO, 2000). Essa extrusora equipada com dupla-rosca contra-rotante foi projetada para remover a umidade da fibra de madeira mesmo em altos níveis (umidade entre 1% e 8%) (GUADANINI, 2001; PLÁSTICO MODERNO, 2000).

O processo inclui uma extrusora principal de dupla-rosca paralela contra-rotativa (L/D 28:1) e outra satélite para o polímero, que pode ser mono- ou dupla-rosca, dependendo da resina empregada. A extrusora principal seca a madeira e depois mistura esse material seco ao polímero fundido. Durante essa etapa, desenvolve-se

pressão na mistura para superar a contra-pressão do cabeçote. A extrusora satélite funde o polímero e entrega-o fundido à madeira seca na extrusora principal.

O processamento de fibras de madeira em extrusora de roscas-duplas paralelas é similar em muitas maneiras ao processamento de polímeros puros (PLÁSTICO MODERNO, 2000). Apesar de alimentadores comuns serem normalmente utilizados para polímeros, um alimentador gravimétrico é utilizado neste caso para alimentar as fibras de madeira na extrusora de dupla rosca. A alimentação automaticamente ajustada pelo alimentador gravimétrico enche os canais das roscas para aumentar a eficiência de alimentação e eliminar as variações de densidade das fibras de madeira. As roscas transportam as fibras para frente na medida em que o calor do barril (canhão) e da rosca é transferido para o material. As fibras de madeira são ligeiramente agitadas nas áreas em forma de C nas duas roscas. O calor transferido para as fibras de madeira não somente aquece a madeira, como no caso de extrusão de polímeros, mas também aquece a água contida nas fibras de madeira até o ponto de vapor, liberando a umidade (plástico moderno, 2000).

No processo WoodTruder, as fibras de madeira são submetidas a uma zona de degasagem ou ponto de vazão (escape atmosférico) para remoção da umidade. As fibras entram na zona de alimentação contendo até 8% de umidade. À medida que a madeira é aquecida, a umidade na superfície evapora e escapa através do ponto de vazão atmosférico (zonas de degasagem) (GUADANINI, 2001).

São utilizadas duas extrusoras: uma principal, responsável pela mistura dos dois componentes (plástico e madeira) e a extrusora satélite que processa o polímero até o ponto de fusão desejado. A mistura entra na seção de compressão da extrusora principal para facilitar a fusão dos dois componentes (GUADANINI, 2001).

Um ponto de escape ou vazão a vácuo está localizado após a zona de compressão para remoção de voláteis do polímero ou umidade residual das fibras de madeira. A mistura completamente seca e homogeneizada segue para a seção de mensuração para aumentar a pressão do fluxo através do cabeçote (GUADANINI, 2001).

Típicas temperaturas de fusão na saída da WoodTruder são de 170 °C a 185 °C. Temperaturas acima de 200 °C devem ser evitadas para reduzir a degradação da madeira (GUADANINI, 2001).

Além da fibra de madeira, pelo processo WoodTruder podem ser processadas fibras da casca de arroz, sisal, kenaf, casca de amendoim e muitos outros materiais (CROMPTON, 2008; EWC.UMAINE, 2006).

O último das quatro processos usualmente empregados na produção de WPC utiliza primeiramente a madeira úmida com alimentação separada do polímero e aditivos também em separado (*Wood First, Split Feed*) (CORREA, 2003). Nesse processo a farinha de madeira pode ser alimentada ainda úmida na zona de alimentação e a mistura de resina e aditivos introduzida posteriormente no barril através de um alimentador lateral (CORREA, 2003; JOBWERX, 2003). Todavia esse processo requer normalmente equipamentos com barris muito longos (L/D 44 ou 48:1) e com zonas de degaseificação próximas a zona de alimentação para remoção da umidade da madeira, o que nem sempre é possível. Esse processo permite obtenção de artefatos com conteúdo de madeira entre 50 a 60% em massa (JOBWERX, 2003).

4 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A Figura 6 apresenta o resumo das atividades experimentais desenvolvidas nessa dissertação.

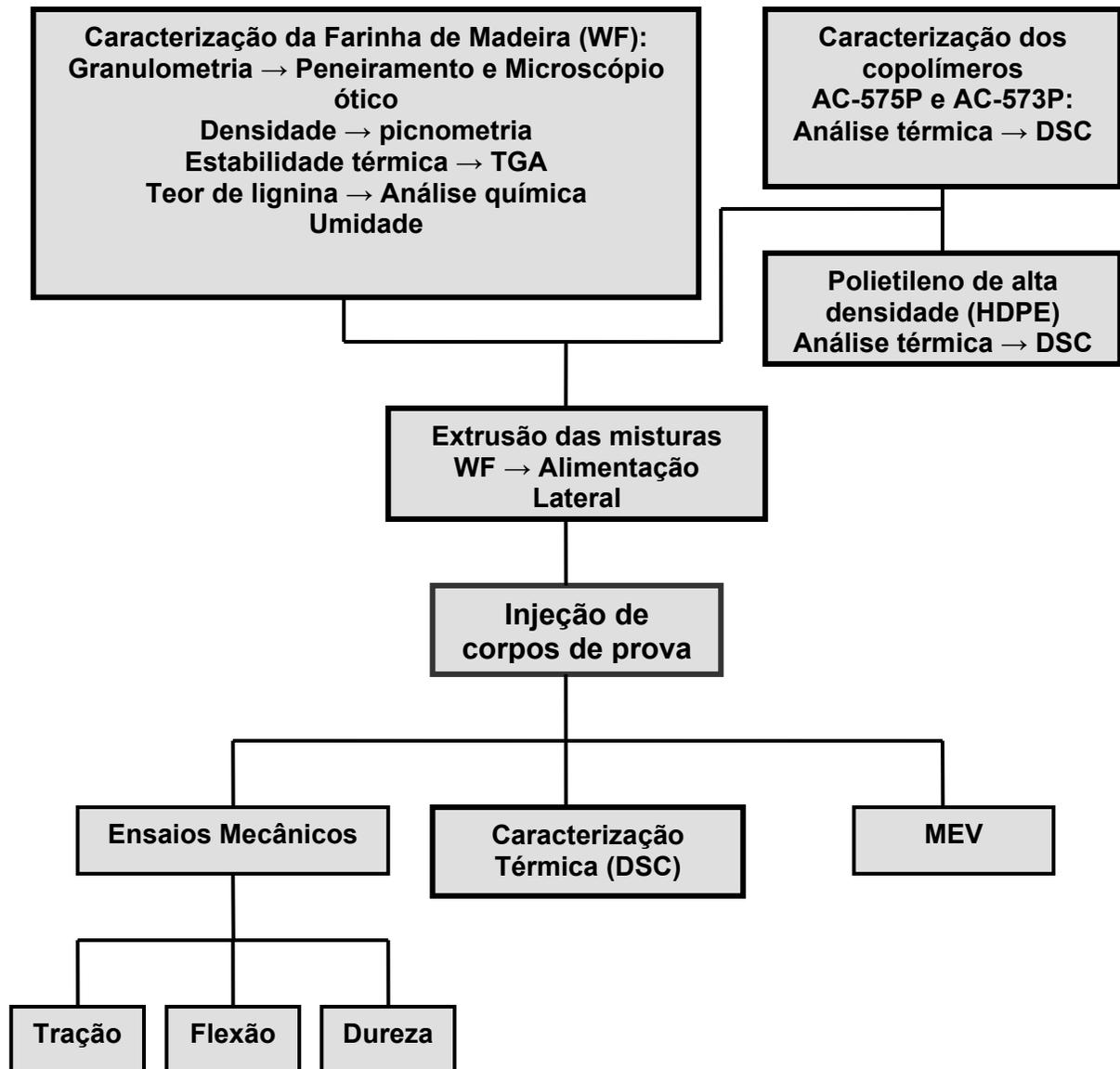


Figura 6: Fluxograma das Atividades Experimentais

4.1 - MATERIAIS

Utilizou-se na formulação dos compósitos, HDPE como matriz polimérica, carga de farinha de madeira e dois agentes de acoplamento, constituídos de polietileno graftizados com anidrido maleico. Além desses materiais, foram utilizados também alguns reagentes na caracterização química do resíduo de madeira. Os materiais e reagentes utilizados estão descritos a seguir.

4.1.1 - Polietileno de alta densidade (HDPE)

O polietileno de alta densidade (HDPE GF 4960) foi fornecido pela empresa Ipiranga. Informações adicionais sobre o material dadas pelo fabricante encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2: Propriedades do HDPE GF 4960 fornecidas pelo fabricante (IDES, 2008)

Propriedades	Norma	unidades	valores
Densidade	ASTM D 792 - 00	g/cm ³	0,961 ± 0,003
Temperatura de Amolecimento Vicat 10 N	ASTM D 1525 - 06	°C	129
Temperatura de Deflexão sob Carga a 455 kPa	ASTM D 648 - 06	°C	79
Resistência ao Impacto IZOD a 23°C	ASTM D 256 - 06	J/m	210
Dureza Shore D/15	ASTM D 2240 - 05	-	64
Módulo de Flexão Secante a 2% (em placa)	ASTM D 790 - 03	MPa	1210
Alongamento na Ruptura (em placa)	ASTM D 638 - 03	%	820
Tensão na Ruptura (em placa)	ASTM D 638 - 03	MPa	35
Alongamento no Escoamento (em placa)	ASTM D 638 - 03	%	6,5
Tensão no Escoamento (em placa)	ASTM D 638 - 03	MPa	32
FRR 21,6/2,16	ASTM D 1238 - 04	-	82 ± 24
MFR 190/21,6	ASTM D 1238 - 04c	g/10 min	28 ± 6
MFR 190/2,16	ASTM D 1238 - 04c	g/10 min	0,34 ± 0,08
ESCR (Cond. B, 100% Igepal)	ASTM D 1693 - 05	F50.h	19

4.1.2 - Farinha de Madeira (WF)

A carga utilizada na produção dos compósitos foi farinha de madeira da espécie cedro (*Cedrella sp.*) (Figura 7). O resíduo de carpintaria possuía cor castanha levemente avermelhada e originalmente apresentava-se com partícula de tamanhos variados, que exigiu seleção por peneiramento.



Figura 7: Amostra de farinha de cedro utilizada nos compósitos WPC

Algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de cedro encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3: Propriedades físicas e mecânicas da madeira de cedro (IBAMA, 2008)

PROPRIEDADES FÍSICAS				
Densidade (g/cm ³)				
Básica		Aparente		
0,39		0,47		
PROPRIEDADES MECÂNICAS				
Condição	Flexão Estática		Dureza Janka	
	Módulo de Ruptura (kgf/cm ²)	Módulo de Elasticidade (1000kgf/cm ²)	Paralelas às Fibras (kgf)	Transversal às Fibras (kgf)
Verde	448	84	287	268
Seca	768	99	762	623
Condição	Tração		Cisalhamento	
	Perpendicular às Fibras		Resistência à Ruptura (kgf/cm)	
	Resistência à Ruptura (kgf/cm ²)			
Verde	30		63	
Seca	29		70	

Densidade básica: relação entre massa seca e seu volume saturado de água (verde)

Densidade aparente: relação entre massa e volume a um teor de umidade conhecido

Dureza Janka: força que é necessário aplicar para fazer penetrar completamente na madeira uma semiesfera de aço cuja secção diametral tem uma superfície de 1cm²

4.1.3 - Agentes de Acoplamento

Foram utilizados nas composições dois agentes de acoplamento (AC-573P e AC-575P) da empresa Honeywell. AC-573P e AC-575P são copolímeros de etileno-anidrido maleico com diferentes propriedades. No Quadro 4 encontram-se mais informações dadas pelo fabricante.

Quadro 4: Propriedades dos aditivos AC-573P e AC-575P (ACWAX, 2008)

Aditivo	Dureza dmm (ASTM D-5)	Densidade g/cc (ASTM D-505)	Viscosidade cps 140°C (Brookfield)	Número de Saponificação mg KOH/g	% (em massa) de anidrido maleico
AC-573P	4,5	0,92	600	5	0,4
AC-575P	4,5	0.92	4200	35	3,0

4.1.4 - Reagentes

Além dos materiais descritos foram utilizados alguns reagentes para a extração da lignina descritos no Quadro 5.

Quadro 5: Reagentes utilizados na extração da lignina do resíduo de madeira

Material	Especificação	Fornecedor
Ácido sulfúrico	P.A.	Vetec
Etanol	P.A.	vetec
Benzeno	P.A.	Grupo Química

4.2 - EQUIPAMENTOS

Além dos aparelhos e vidrarias comuns de laboratório foram utilizados os seguintes equipamentos, todos localizados no Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, durante a execução dos procedimentos experimentais:

- Extrusora dupla-rosca co-rotante Teck Tril, modelo DCT20; 20mm, com L/D = 36 dotada de sistema de degasagem, alimentador lateral e banho para resfriamento dos perfis extrusados.
- Injetora de bancada Ray-Ran, modelo RR 3400;

- Estufa com circulação de ar – Erzinger Ind. Mec. Ltda.;
- Moinho de faca, Primotécnica Mecânica e Eletricidade Ltda. – Modelo P1003– Série SBC 312 – No 040850.96 – 5 HP;
- Peneirador elétrico Produtest, modelo T;
- Microscópio ótico Olympus, modelo BX50;
- Microscópio eletrônico de varredura (SEM) – Jeol, modelo JSL 5300;
- Máquina Universal de Ensaio Instron, modelo 4204;
- Durômetro, Shore ASTM D2240 Tipo “A1”
- Paquímetro Mitutoyo – sensibilidade de 0,05mm;
- Analisador termogravimétrico (TGA) TA Instruments, modelo Q500;
- Calorímetro diferencial de varredura (DSC) TA Instruments, modelo Q100.

4.3 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A farinha de madeira utilizada nos compósitos foi caracterizada quanto ao teor de lignina, à densidade, e ao teor umidade, ao tamanho das partículas e à estabilidade térmica.

Os materiais obtidos por extrusão e, posteriormente, injetados para produção de corpos de prova, foram analisados através de suas propriedades mecânicas, morfológica e térmica. A matriz polimérica e os agentes de acoplamento também foram submetidos à análise térmica por DSC.

4.3.1 - Determinação do Teor de Lignina

O teor de lignina presente na serragem foi determinado a partir de sua extração pelo método de Klason (SALIBA, 2001). Esse método consiste na remoção de polissacarídeos por hidrólise ácida, seguida da liberação da lignina como resíduo.

Inicialmente, a amostra foi colocada em um extrator Soxhlet com uma solução etanol/benzeno (3:1 v/v) e mantida em ebulição por 12 horas. Após esse período, o material foi colocado em estufa a 60 °C por um período de 16 horas. Essa primeira etapa foi realizada para eliminar da amostra a presença de resinas que poderiam mascarar a quantificação do teor de lignina (SANTOS, 2002).

Em seguida o material foi colocado em solução de ácido sulfúrico 72% v/v a temperatura ambiente por um período de 2 horas com freqüente agitação. Posteriormente, adicionou-se água destilada ao meio reacional até reduzir a concentração da solução ácida a 3 % v/v. A solução foi transferida para um sistema com condensador de refluxo e aquecida até ebulição durante 4 horas. Após esse período de 4 horas, a lignina foi lavada com água quente até neutralização, filtrada e seca em estufa até peso constante e, então, pesada. O teor de lignina foi determinado a partir da média dos resultados de três medidas, utilizando-se a Equação 1 (MORAIS, 2005).

$$\%L_i = \frac{m_1 \times 100}{m_2} \quad (1)$$

Em que,

$\%L_i$ = lignina insolúvel na amostra,

m_1 = massa de resíduo (g), em base seca e

m_2 = massa da amostra (g), base seca.

4.3.2 - Teor de Umidade

O teor de umidade da farinha de cedro foi analisado colocando-se uma massa conhecida do material em estufa até valor constante, segundo a norma ASTM D1348-61. O teste foi realizado em triplicata e a determinação do teor de umidade foi realizado utilizando-se a Equação 2.

$$\% \text{ umidade} = \frac{(\text{massa da amostra úmida} - \text{massa da amostra seca}) \times 100}{\text{massa da amostra úmida}} \quad (2)$$

4.3.3 - Densidade

A densidade da farinha de madeira foi determinada por picnometria. Esse método consiste na determinação da densidade aparente de materiais sólidos por meio da medição indireta da massa e do volume do sólido em balão volumétrico de fundo chato (picnômetro), utilizando água ou outro líquido.

O procedimento para medida da densidade da serragem foi realizado segundo a norma ISO 8962. O cálculo foi realizado utilizando-se a Equação 3.

$$\text{Densidade} = \frac{\rho (m_3 - m_1)}{(m_3 - m_1 + m_2 - m_4)} \quad (3)$$

Em que,

ρ = Densidade do etanol na temperatura do teste (g/mL);

m_1 = massa do picnômetro limpo e seco (g);

m_2 = massa do picnômetro repleto de etanol (g);

m_3 = massa do picnômetro contendo cerca de 2g de fibra (g);

m_4 = massa do picnômetro contendo fibra e etanol (g).

A densidade foi determinada a partir da média dos resultados de cinco medidas realizadas à temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C.

4.3.4 - Determinação do Tamanho das Partículas

O tamanho das partículas da serragem foi determinado por peneiramento, seguido de análise em microscópio ótico.

4.3.4.1 - Peneiramento da Serragem

A serragem foi peneirada em um peneirador eletromecânico de 6 peneiras 8x2 com dispositivo para controle da frequência das vibrações e relógio automático de até 1 hora. Foram utilizadas 4 peneiras (20, 40, 70 e 100 mesh) para determinação da distribuição dos tamanhos das partículas que compunham o material. Entretanto na produção dos compósitos utilizou-se a serragem retida entre duas peneiras (70 e 100 mesh) de modo a limitar o tamanho máximo e mínimo das partículas (0,150 e 0,210 mm).

O Quadro 6 apresenta o tamanho da abertura das peneiras utilizadas para determinação da distribuição do tamanho das partículas da amostra original da serragem

Quadro 6: Descrição das peneiras utilizadas na classificação da farinha de madeira por tamanho

Malha (ASTM)	Abertura (mm)
20	0,840
40	0,420
70	0,210
100	0,150

4.3.4.2 - Microscopia Ótica

A fração da amostra retida entre as peneiras de 70 e 100 mesh foi submetida à análise em um microscópio ótico Olympus BX-50, Stereo SZH 10 equipado com

máquina digital Nikon cool pix 5400. Foram obtidas a partir desse equipamento fotos do material.

4.3.5 - Análise Termogravimétrica

A estabilidade térmica da carga de madeira foi avaliada por termogravimetria em um analisador termogravimétrico (TGA) sob atmosfera de nitrogênio e utilizando velocidade de aquecimento de 10 °C/min, em uma faixa compreendida entre 30 °C e 700 °C.

4.3.6 - Obtenção dos Compósitos

Para a produção dos compósitos foram realizadas 12 formulações, variando-se o teor de carga, a presença e tipo de copolímero conforme descrito na Quadro 6.

Quadro 6: Formulações dos compósitos de HDPE com farinha de madeira

Polímero	Teor de Carga (% p/p)	Compósitos WPC		
		Sem copolímero	AC-573P (10% p/p)	AC-575P (10% p/p)
HDPE	0	PE	PE-573P	PE-575P
	10	PE10W	PE10W-573P	PE10W-575P
	20	PE20W	PE20W-573P	PE20W-575P
	30	PE30W	PE30W-573P	PE30W-575P

4.3.6.1 - Preparação da Serragem

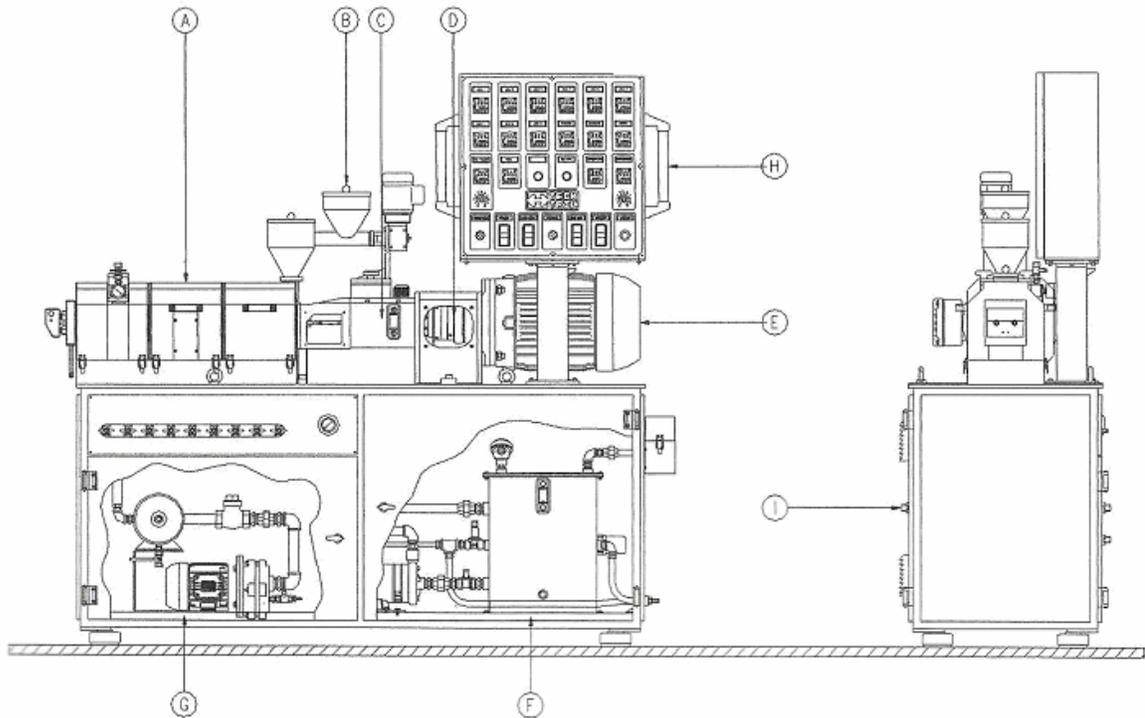
A serragem, após ser peneirada, foi submetida à secagem em estufa com circulação de ar durante 24 horas a uma temperatura de 105 °C permanecendo em dessecador para evitar reabsorção de água até a ocasião do processamento.

4.3.6.2 - Processamento

Os compósitos foram obtidos por processamento em extrusora dupla-rosca co-rotacional inter-penetrante TECK TRIL, modelo DCT20, com diâmetro das roscas de 20mm, com $L/D = 36$, dotada de alimentadores principal e lateral e sistema de degasagem. A Figura 8 apresenta alguns detalhes dessa máquina.

O processo utilizado foi o que utiliza a madeira pré-seca e alimentação do polímero em separado (pre-dry; split feed) conforme descrito no item 3.4.2.

O perfil das roscas juntamente com a posição de adição dos materiais é apresentado na Figura 9. Os polímeros foram adicionados no funil principal e foram fundidos e homogeneizados na primeira zona de mistura da rosca. A farinha de madeira (WF) foi introduzida na extrusora por meio de alimentador lateral, junto aos polímeros fundidos. A homogeneização da farinha de madeira com o polímero foi realizada na segunda zona de mistura da rosca. A inserção da madeira na extrusora nessa zona da rosca foi realizada de modo a diminuir o tempo de residência da carga no equipamento para evitar sua degradação sob ação do calor. Após a homogeneização da farinha de madeira com os polímeros, a massa fundida foi degasada.



Identificação das Partes que Compõem o Equipamento

- A - canhão e rosca
- B - alimentador
- C - transmissão
- D - acoplamento limitador de torque
- E - motor principal
- F - refrigeração
- G - filtro separador da degasagem
- H - painel de comar
- I - painel elétrico

Figura 8: Extrusora dupla-rosca utilizada na produção dos compósitos WPC

O perfil de temperatura de processamento foi o mesmo para todas as formulações. A temperatura da zona 1 foi de 150 °C, das zonas 2 a 9 e do cabeçote foi de 200 °C. A velocidade das roscas empregada foi de 300 rpm.

As demais condições de processamento das formulações encontram-se no Quadro 7.

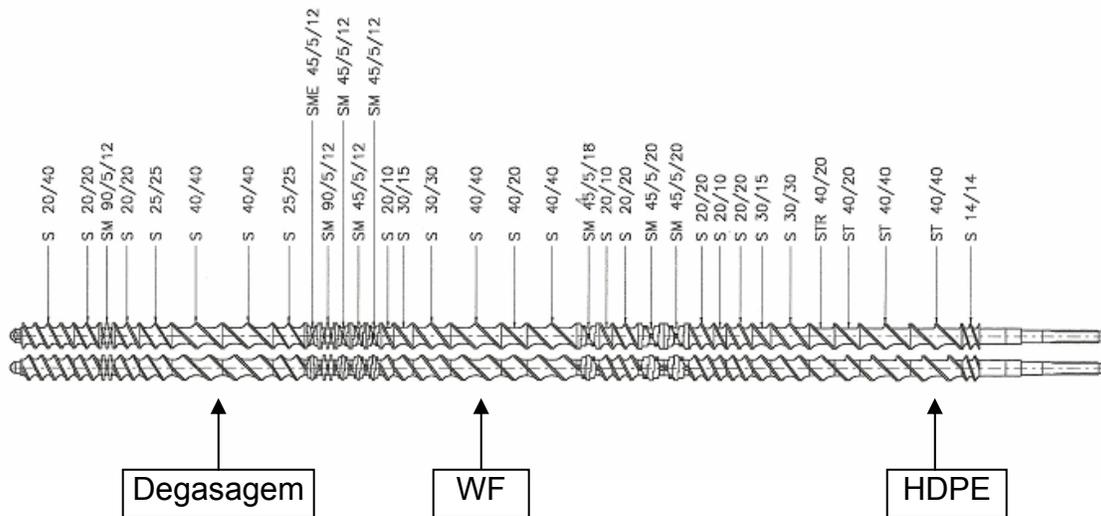


Figura 9: Perfil da rosca da extrusora

Quadro 7: Condições de processamento dos materiais em extrusora dupla-rosca

Composição PE/WF (% p/p)	Material	Velocidade de alimentação PE (alimentador principal) e WF(alimentador lateral)(rpm)	Vazão (Kg/h)
100/0	PE	18	10
	WF	0	0
90/10	PE	18	9
	WF	20	1
80/20	PE	16	8
	WF	40	2
70/30	PE	13	7
	WF	57	3

A vazão de alimentação dos materiais foi mantida constante em 10 Kg/h. A partir desse parâmetro, as velocidades do alimentador principal e do alimentador lateral para cada formulação foram determinadas através da construção de curvas de calibração vazão de alimentação (Kg/h) em função da velocidade da rosca (rpm) para o HDPE e para farinha de madeira.

Após serem processados, os compósitos obtidos no formato de fita foram cortados com auxílio de uma guilhotina e depois moídos em um Moinho de faca (Figuras 10 e 11) visando obter pedaços menores para produção dos corpos de prova por injeção.



Figura 10: WPC extrusado e moído para utilização em injetora.



Figura 11: HDPE extrusado e moído para utilização em injetora.

4.3.6.3 - Injeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados na caracterização morfológica e mecânica dos compósitos foram moldados em uma injetora. A temperatura da zona de alimentação foi de 190 °C e a do molde foi de 70 °C. A pressão de injeção foi de 100 psi tanto para os materiais sem carga como para as formulações com serragem.

4.3.7 - Ensaio de Resistência à Tração

Para os ensaios de tração foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaios Instron, modelo 4204. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D638, à temperatura de 22 °C. Foi adotada uma força de 1 kN e velocidade de 5 mm/min. Foram testados 8 corpos de prova de cada material.

4.3.8 - Ensaio de Resistência à Flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados segundo a norma ASTM D790-92, a temperatura de 22 °C. A velocidade de ensaio usada foi de 1mm/min com espaçamento entre barras de 50 mm, célula de carga de 1 kN e método de três apoios. Foram testados 8 corpos de prova de cada material.

4.3.9 - Dureza

A dureza das amostras foi determinada em durômetro Shore tipo A1, de acordo com a norma ASTM D 2240. Foram registradas cinco medidas em pontos diferentes, tomando-se a mediana como resultado para esta propriedade.

4.3.10 - Microscopia eletrônica de Varredura

A análise dos materiais por microscopia eletrônica de varredura foi realizada com ampliação de 100 a 300 vezes e voltagem de aceleração de elétrons igual a 15 KV.

Foram analisadas as superfícies de fratura dos corpos de prova preparados por injeção. A fratura foi realizada manualmente após imersão dos corpos de prova em nitrogênio líquido durante alguns minutos. As amostras fraturadas foram recobertas com uma fina camada de ouro e posteriormente observadas em microscópio eletrônico de varredura com objetivo de estudar sua morfologia.

4.3.11 - Calorimetria Diferencial de Varredura

As amostras foram submetidas ao ensaio calorimétrico em um calorímetro diferencial de varredura (DSC), sob atmosfera de nitrogênio. Os materiais foram submetidos a uma faixa de temperatura que variou de 0 °C a 170 °C, a velocidade de 10 °C/min.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da caracterização da serragem de madeira natural e das misturas dessa serragem e polietileno de alta densidade em extrusora dupla-roca co-rotacional. As misturas foram avaliadas quanto à suas propriedades mecânicas, por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por análise térmica (DSC).

5.1 - CARACTERIZAÇÃO DA SERRAGEM

A serragem foi classificada por tamanho de suas partículas e caracterizada segundo o seu teor de lignina, de umidade, a densidade e por análise térmica (TGA).

A serragem de cedro utilizada na produção dos compósitos WPC (*Wood plastic composites*) apresentou aspecto heterogêneo, com partículas de tamanhos variados (Figura 12).

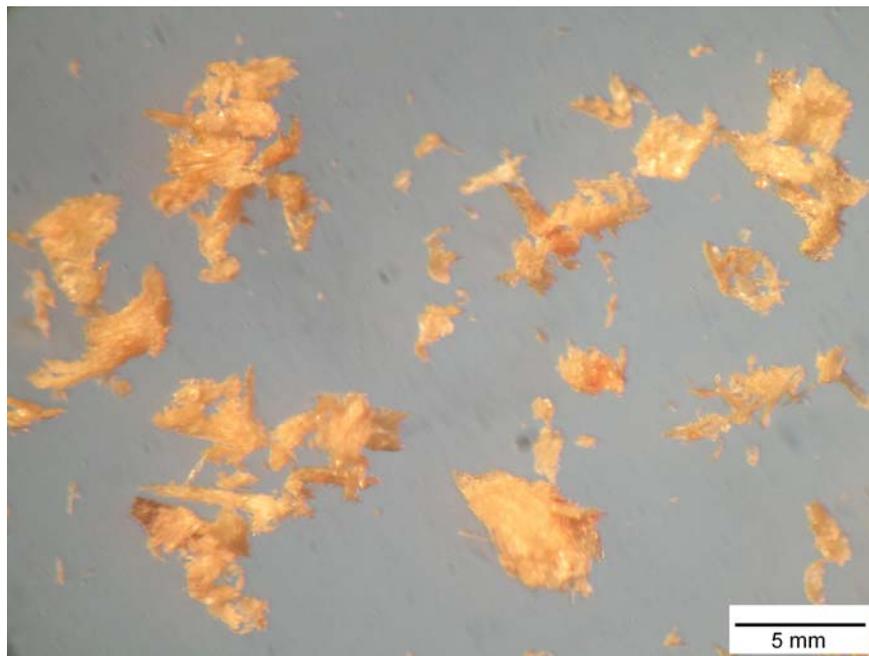


Figura 12: Fotografia em microscópio óptico da serragem como recebida.

5.1.1 - Determinação do Tamanho das Partículas

Em função da ausência de uniformidade no tamanho dessas partículas, a serragem foi submetida à seleção por peneiramento em um peneirador eletromecânico utilizando-se 4 peneiras. As peneiras utilizadas com 20, 40, 70 e 100 mesh apresentam tamanho da abertura da malha de 0,840 mm, 0,420 mm, 0,210 mm e 0,150 mm, respectivamente. A classificação da serragem de madeira quanto ao tamanho das partículas encontra-se na Figura 13.

Na obtenção dos compósitos foi utilizada a fração da serragem de madeira retida entre as peneiras de 70 e 100 mesh. Optou-se por utilizar essa fração da amostra de cedro, pois foi a que apresentou alimentação mais homogênea no alimentador lateral da extrusora.

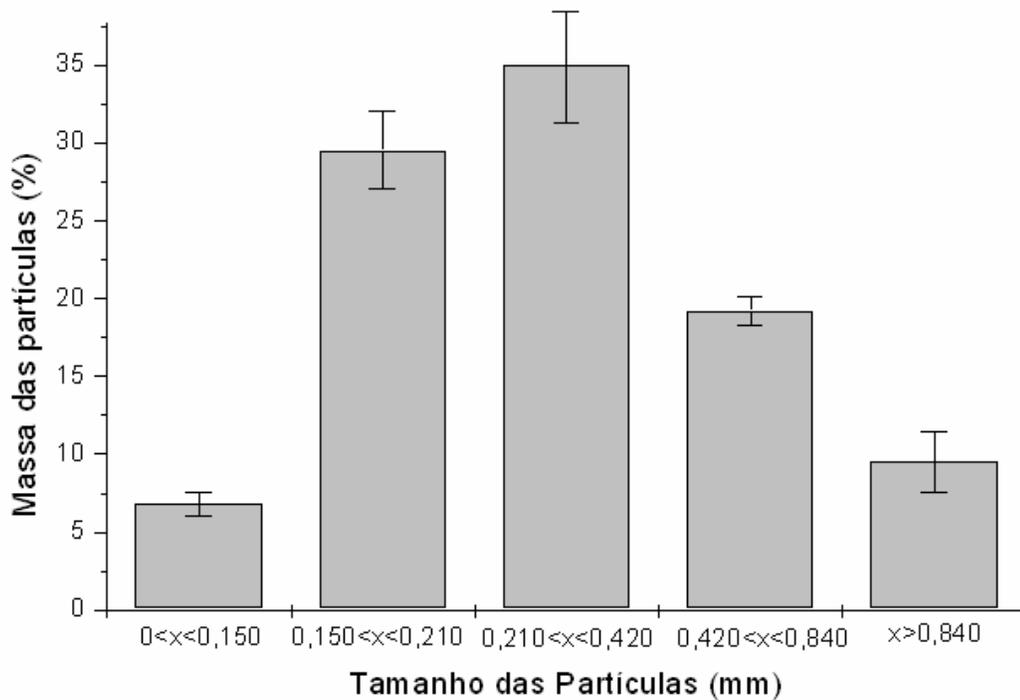


Figura 13: Fração percentual em massa das partículas retidas na peneira *versus* faixa de tamanho das partículas

A determinação do tamanho das partículas da serragem de madeira foi feita pela separação de seus diferentes tamanhos por peneiramento conforme o item 4.3.4.1. Posteriormente foram tiradas fotografias em microscópio ótico das partículas da amostra de cedro, retidas na peneira de 100 mesh, utilizadas na obtenção dos compósitos. O tamanho das partículas foi restringido entre 0,150 mm e 0,210 mm, contudo por peneiramento só é possível delimitar duas das suas dimensões. É possível obter partículas com perfis longos e curtos por peneiramento, desde que duas dimensões estejam dentro do limite das apresentadas pelas peneiras.

A Figura 14 apresenta a imagem da amostra de serragem obtida por microscopia ótica após ser peneirada. Pode-se observar que as partículas de madeira apresentadas na foto não exibem perfil alongado em sua maioria.

De acordo com tamanho, essas partículas podem ser classificadas como pó que, segundo Koenig e Sypkens (2002), são definidas como partículas que apresentam tamanhos menores que 20 mesh (0,840 mm). O tamanho de partículas do pó de madeira comercial varia entre 20 e 100 mesh (YAMAJI, 2004a). Pela definição encontrada na literatura, a farinha de madeira utilizada neste trabalho para o desenvolvimento dos compósitos pode ser classificada como pó.

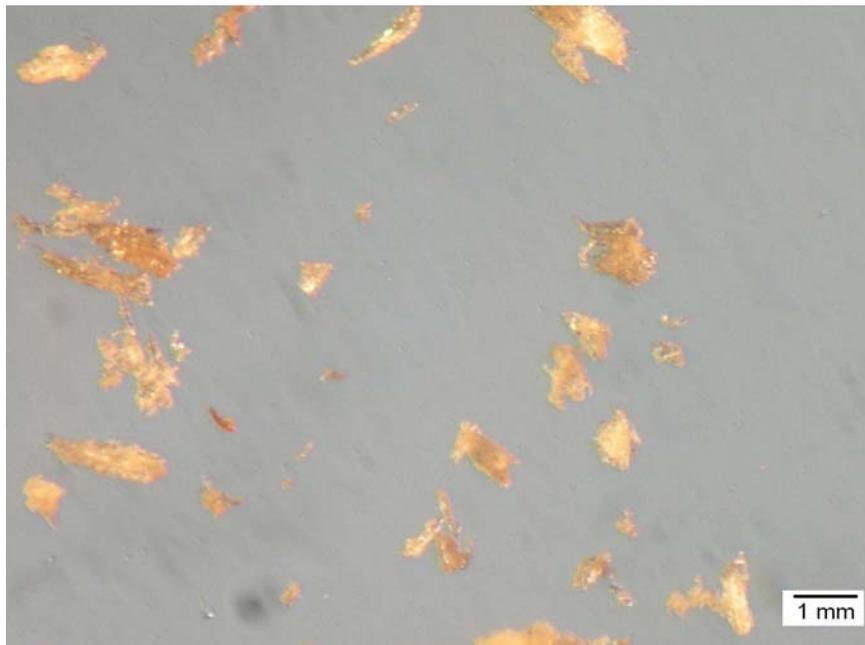


Figura 14: Fotografia em microscópio ótico da amostra de farinha de madeira retida entre as peneiras com 70 e 100 mesh.

5.1.2 - Avaliação do Teor de Lignina

A lignina é um polímero natural aromático amorfo que ocorre na parede celular de plantas superiores em diferentes composições. Entre essas plantas, têm-se as folhosas, que apresentam de 18 a 25% de lignina, as coníferas com 25 a 35% de lignina e gramíneas com 10 a 30% de lignina (BONONI, 1999; LARS, 2000).

As madeiras folhosas têm sido preferidas na produção de compósitos plástico-madeira apesar de apresentarem um teor de lignina inferior ao das coníferas (KOENIG, 2002; YAMAJI, 2004a). Segundo Koenig e Sypkens (2002), essa preferência na utilização de folhosas deve-se a presença de compostos aromáticos inflamáveis, como alguns taninos, na composição das coníferas.

Um maior teor de lignina seria interessante do ponto de vista do desempenho mecânico, pois a lignina é o constituinte responsável pela resistência mecânica da madeira (SALIBA, 2001). Segundo Amim (2006), a lignina tem um efeito positivo sobre algumas propriedades mecânicas dos compósitos.

A determinação do teor de lignina do cedro foi realizada por extração pelo método de Klason, conforme descrito no item 4.3.1, que promove a hidrólise ácida para remoção de polissacarídeos do material lignocelulósico e, em seguida libera a lignina como resíduo.

O teor de lignina do resíduo de madeira de cedro obtido experimentalmente foi de $27,4 \pm 0,7$ % em massa, valor um pouco acima daqueles encontrados na literatura, visto que essa madeira é um tipo de árvore folhosa.

Yamaji (2004a) em seu trabalho sobre compósitos plástico-madeira utilizando resíduos de folhosas (copaíba e amescla) encontrou um teor de lignina de 24,7 %.

A variação no valor do teor de lignina não deve ser atribuída somente à diferença de espécies. De acordo com Kollmann e Côté (1984), a madeira pode apresentar uma grande variação na composição química, até mesmo em se tratando de uma mesma espécie, por ser um material heterogêneo. Segundo Trugilho e colaboradores (2005) as

variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira ocorrem em função principalmente da idade, de fatores genéticos e ambientais.

5.1.3 - Teor de Umidade

O teor de umidade da farinha de cedro foi determinado através da secagem de uma amostra do material em estufa até peso constante.

O teor de umidade encontrado para a farinha de cedro utilizado na obtenção dos compósitos WPC foi de $8,9\% \pm 0,5$. Esse valor pode ser considerado baixo, quando comparado aos valores normalmente encontrados para umidade da madeira que ficam entre 10-18% (YAMAJI, 2004b).

Schut (1999) e Clemons (2002) consideram que um teor de umidade do resíduo de madeira acima de 1% é elevado para processamento em extrusoras.

Extrusoras com dupla-rosca são desenhadas para processar misturas de polímeros e têm um ponto de vazão ou escape para a remoção de voláteis, porém insuficiente para umidade acima de 1% (PLÁSTICO, 2001). Desta forma, resíduos de madeira com umidade superior a 1% devem ser, preferencialmente, submetidos à secagem antes do processamento.

5.1.4 - Densidade

Segundo Jankowsky e colaboradores (1990), a madeira do cedro possui densidade aparente entre 0,47 e 0,61 g/cm³, a 15% de umidade, e densidade básica de 0,44 g/cm³. A densidade aparente é a relação entre a massa e o volume da madeira determinados nas mesmas condições de umidade e a densidade básica é a relação entre o peso seco da madeira e o respectivo volume em estado de completa saturação de água (REZENDE, 1988).

A madeira pode ser classificada quanto a sua densidade aparente em leve, moderadamente densa, densa e muito densa. As madeiras leves são aquelas com densidade aparente menor ou igual a $0,50 \text{ g/cm}^3$, para as moderadamente densas essa propriedade fica entre $0,51$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$, para as densas entre $0,76$ e $0,99 \text{ g/cm}^3$ e para as muito densas acima de $1,00 \text{ g/cm}^3$.

Por meio de picnometria, descrita no item 4.3.3, foi determinada a densidade aparente da farinha de madeira, obtendo-se um valor médio de $0,55 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Segundo a literatura (JANKOWSKY, 1990), o cedro utilizado nessa dissertação trata-se, portanto, de uma madeira moderadamente densa.

O valor encontrado experimentalmente para densidade da madeira de cedro é muito inferior a muitas cargas minerais e também a algumas naturais. As cargas minerais, como o carbonato de cálcio, fibra de vidro, talco e caulim, possuem densidade na ordem de $2,7 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a densidade das cargas naturais como algodão, sisal, juta e coco, fica em torno de $1,4 \text{ g/cm}^3$ (AMIM, 2006; BISMARCK, 2006; GASSAN, 2000).

A baixa densidade da farinha de madeira representa uma vantagem frente às cargas convencionais na obtenção de compósitos, pois sua utilização representa a obtenção de compósitos mais leves.

5.1.5 - Análise Termogravimétrica

Devido à carga de madeira ser susceptível à degradação quando processada em temperaturas elevadas torna-se necessário o conhecimento de sua estabilidade térmica. O estudo do comportamento térmico da madeira é importante para determinação da temperatura máxima de processamento sem que haja perda significativa de massa dessa carga por degradação de seus componentes, o que pode causar prejuízo nas propriedades dos compósitos.

A Figura 15 mostra a curva termogravimétrica obtida da madeira de cedro que representa a perda percentual de massa da amostra de madeira utilizada nos experimentos com aumento da temperatura.

Observando-se a curva da Figura 15 verifica-se três perdas de massas que são representadas pelos picos da derivada da curva de TGA. A perda de massa inicial é atribuída a materiais voláteis presentes na madeira.

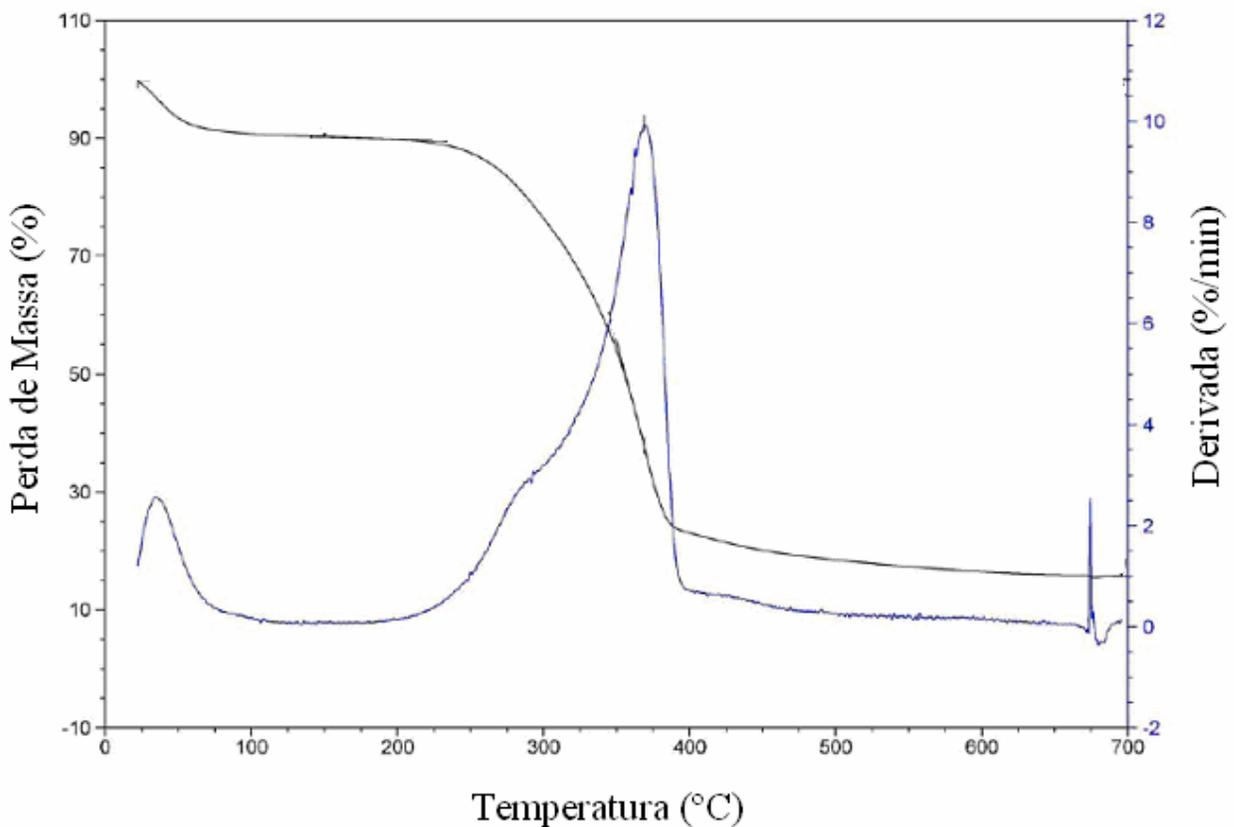


Figura 15: Curva termogravimétrica da farinha de madeira de cedro em presença de N_2 .

Esses voláteis são terpenos, álcoois, ésteres, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos alifáticos e fenóis (LIU, 2005).

Na madeira de cedro analisada, a perda de massa que pode estar associada aos materiais voláteis representa aproximadamente 9,7% do total da massa da amostra analisada.

A segunda e a terceira perda de massa são atribuídas à degradação dos componentes da madeira. Em aproximadamente 225 °C iniciou-se segunda perda de massa, indicando o limite de estabilidade térmica do material nessa temperatura. Como ocorre sobreposição de picos não é possível determinar a temperatura em que se encerra a segunda perda de massa, da mesma maneira, não se pode determinar a temperatura em que se inicia a terceira perda de massa.

A maior parte da perda da massa da amostra analisada ficou compreendida entre 225 °C e 400 °C. Contudo, acima dessa faixa de temperatura, a perda de massa continuou a acontecer, porém de forma reduzida. A amostra alcançou aproximadamente 84% de redução de sua massa a 700 °C.

A pico iniciado em 225 °C pode ser associado com a degradação da hemicelulose. Entre os componentes das fibras lignocelulósicas, a hemicelulose é a menos resistente à degradação térmica, o que ocorre em função da sua natureza amorfa e menos estável, seguida pela celulose e lignina (AMIM, 2006). Contudo, pela análise da curva de TGA (Figura 15) não foi possível verificar a temperatura na qual termina a degradação da hemicelulose e inicia a da celulose e da lignina. Isso ocorre devido por existir sobreposição dos estágios de degradação, o que é atribuído ao fato dos componentes da madeira degradarem-se em faixas de temperaturas sobrepostas. Segundo Kim e colaboradores (2004), a hemicelulose degrada-se entre 150 °C e 350 °C, a celulose entre 275 °C e 350 °C e lignina entre 250 °C e 500 °C.

Segundo Gao e colaboradores (2004) a celulose inicia a perda de massa principalmente em temperaturas abaixo de 300 °C e, é o componente da madeira que completa seu ciclo de perda de massa mais rápido até a carbonização, tendo a maior quantidade de voláteis de todos os componentes da madeira. Já a lignina, em temperaturas até 600°C sua degradação não excede 60% de sua massa.

Kim e colaboradores (2004) encontraram como resultado de análises termogravimétricas em casca de arroz uma faixa de temperatura de degradação da lignina compreendida entre 250 °C e 500 °C.

A temperatura máxima de degradação da hemicelulose e da celulose encontrada na literatura em até 350 °C indica que a lignina é o componente da madeira termicamente mais estável, visto que o processo de perda de massa da amostra de madeira cedro continua acima dessa temperatura, sendo, portanto, associada à lignina.

5.2 - OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS

A seguir estão descritos os resultados obtidos a partir do processamento das 12 formulações programadas variando-se o teor de carga, a presença e tipo de copolímero adicionado.

A serragem de madeira utilizada nos compósitos WPC foi beneficiada primeiramente por peneiramento e depois por secagem em estufa.

Para produção dos compósitos WPC, optou-se por utilizar a fração da farinha de madeira peneirada com tamanho entre 0,150 e 0,210 mm. Segundo Bledzik (1999), partículas curtas e finas com tamanho até 0,35 mm são preferidas na produção de compósitos plástico-madeira. Essas partículas fornecem uma maior área superficial, são distribuídas mais homogeneamente na matriz polimérica em comparação com as partículas longas, além de apresentar menor quebra durante o processamento (ASHORI, 2008).

A farinha de madeira selecionada por peneiramento apresentou umidade 8,6 % em massa (item 5.2). Schut (1999) cita que resíduos de madeira com teores acima de 0,7 % em massa podem promover o efeito de um agente de esponjamento. Além disso, um teor elevado de umidade prejudica a dispersão das partículas nos compósitos que tendem a formar agregados durante o processamento (BLEDZIK, 1999).

Portando, para se evitar a ocorrência de problemas dessa natureza durante o processamento, a farinha de madeira foi submetida à secagem em estufa como descrito

no item 4.3.6.1. O teor de umidade da farinha de madeira, após a secagem em estufa, foi de aproximadamente 1% em massa.

Foram obtidos perfis em formato de fita das formulações contendo 10, 20 e 30% em massa de farinha de madeira. Para se obter composições com esses teores de carga variou-se a velocidade dos alimentadores principal e lateral. A velocidade de cada alimentador necessária para se obter as composições com diferentes teores de carga foi determinada pela curva vazão de alimentação (kg/h) em função da velocidade da rosca (rpm) do alimentador, para o HDPE e para farinha de madeira (Figuras 16 e 17).

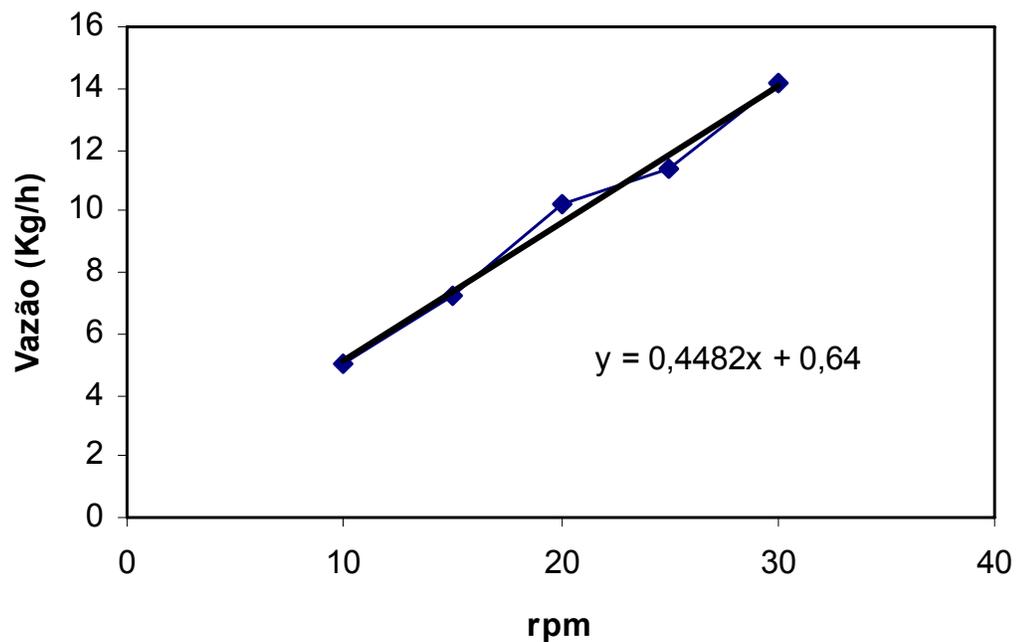


Figura 16: Curva de calibração do alimentador principal (vazão de alimentação do HDPE em função da velocidade da rosca)

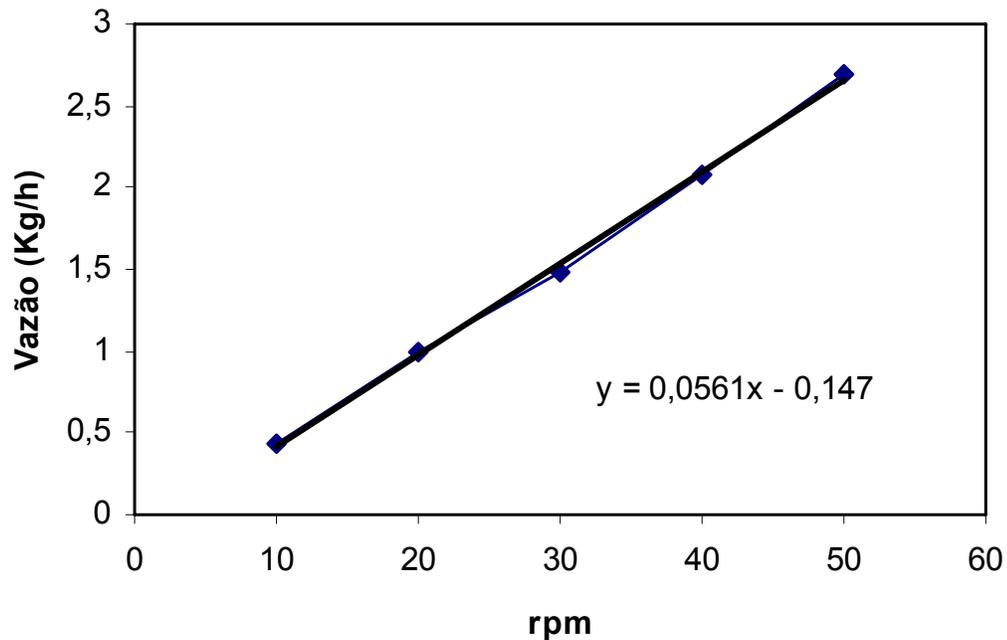


Figura 17: Curva de Calibração do Alimentador Lateral (vazão de alimentação da WF em função da velocidade da rosca)

As fitas obtidas pelo processamento possuíam dimensões de aproximadamente 25 mm de largura e 3,5 mm de altura. Durante o processamento em extrusora dupla-rosca, observou-se que as fitas com 20 e 30% em massa de farinha de madeira (WF) rompiam-se facilmente em relação à fita com teor de 10% em massa, característica que se mostrou mais pronunciada no compósito com 30% em massa da carga, indicando uma baixa resistência do fundido desses materiais. Esse fato levou a algumas interrupções do processo devido ao rompimento que ocorria nesses perfis.

A superfície da fita obtida para mistura com 10% em massa de carga mostrou-se lisa e homogênea, porém, com o aumento da quantidade de carga as superfícies dos compósitos apresentaram rugosidades e irregularidades (Figura 18).

Os perfis dos compósitos com copolímero apresentaram o mesmo aspecto daqueles sem copolímero para o mesmo teor de farinha de madeira.

Os compósitos plástico-madeira apresentaram cheiro característico da madeira de cedro e cor ligeiramente mais escura do que o resíduo utilizado provavelmente devido ao aquecimento a que o material foi submetido (200 °C).

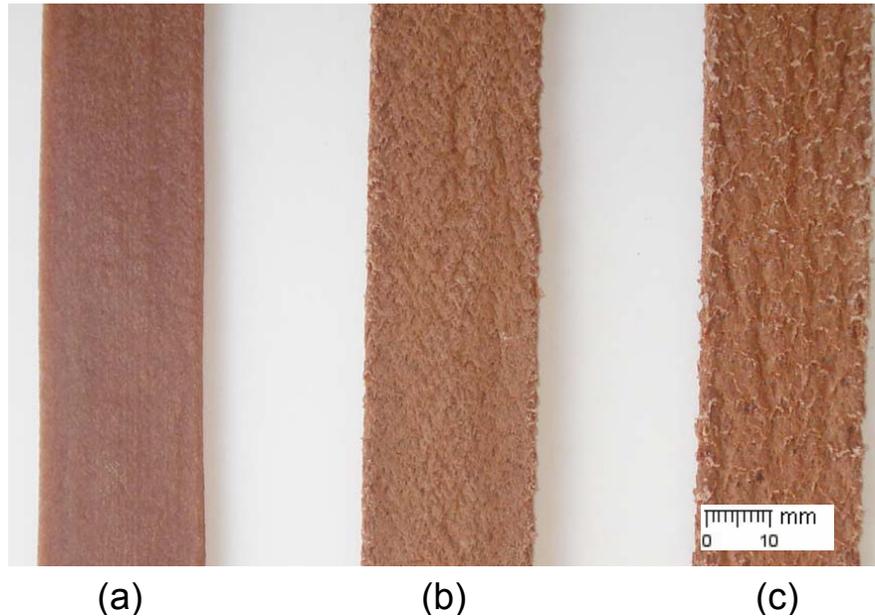


Figura 18: Fotografia dos perfis obtidos (a) com 10% em massa de WF (b) com 20% em massa de WF (c) com 30% em massa de WF

5.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS

A seguir encontram-se os resultados das propriedades mecânicas das formulações extrusadas. Foi avaliado o efeito do aumento do teor de farinha de madeira e o da presença dos copolímeros AC-573P e AC-575P nas propriedades mecânicas dos materiais.

Segundo Correa (2003) é possível obter ganhos significativos nas propriedades mecânicas de compósitos plástico-madeira em relação ao polímero puro pelo acréscimo de farinha de madeira como carga de reforço, principalmente no que se refere à rigidez dos compósitos.

O uso de poliolefinas graftizadas com anidrido maleico como agente de acoplamento também tem mostrado um efeito de acréscimo nas propriedades mecânicas de compósitos plástico-madeira. O melhor desempenho com o uso desses copolímeros com anidrido maleico é atribuído ao aumento da adesão e da interação entre cargas celulósicas e poliolefinas (CORREA, 2003; KAZAYAWKO, 1999; KEENER, 2004; QIU, 2003; WIELAGE, 2003)

5.3.1 - Propriedades sob Tração

As propriedades sob tração avaliadas foram o módulo elástico, a resistência à tração e o alongamento na ruptura.

5.3.1.1 - Módulo sob Tração

Os valores encontrados para o módulo sob tração das formulações com e sem adição de copolímero de etileno e anidrido maleico encontram-se na Figura 19.

A Figura 19 mostra que a adição da farinha de madeira ao HDPE sem copolímero conduz a um acréscimo no módulo de elasticidade sob tração de aproximadamente 21, 30 e 54% nos compósitos com 10, 20 e 30% em massa de carga, respectivamente. O polietileno puro apresentou 690 MPa de módulo elástico sob tração.

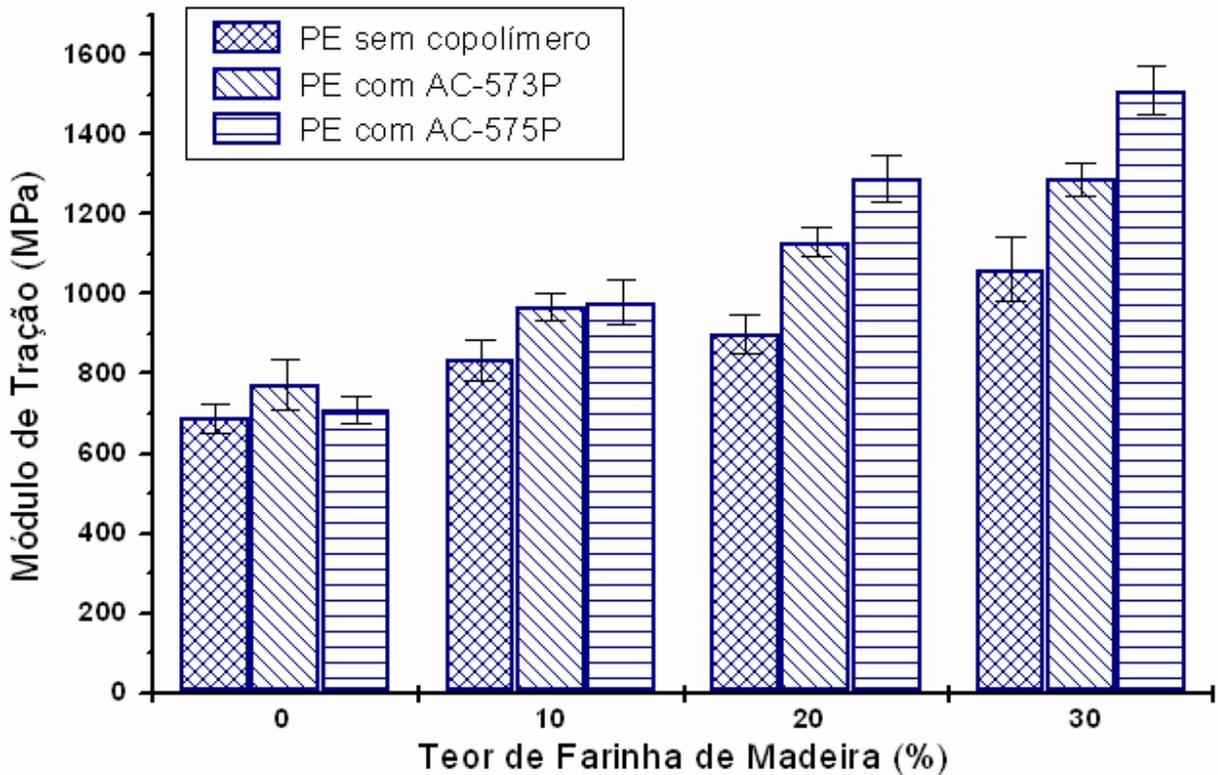


Figura 19: Módulo elástico sob tração dos compósitos com e sem copolímero em função do teor de madeira

O incremento no módulo elástico com o aumento do teor de madeira mostrou-se ainda mais pronunciado nos compósitos com os copolímeros de etileno e anidrido maleico AC-573P e AC-575P do que nos compósitos sem copolímero.

Nas composições com copolímero AC-573P houve um incremento no módulo de aproximadamente 25, 46 e 67% para as misturas contendo 10, 20 e 30% em massa de farinha de madeira, respectivamente. O polietileno extrusado somente com o copolímero AC-573P apresentou módulo elástico de 773 MPa. Para as composições contendo o copolímero AC-575P, observou-se um aumento de aproximadamente 38, 81 e 100%, também referentes às misturas com 10, 20 e 30% em massa de farinha de madeira, respectivamente. O módulo elástico sob tração do HDPE com AC-575P sem carga foi de 711 MPa.

Colom e colaboradores (2003) encontraram um aumento do módulo elástico sob tração de aproximadamente 24 a 85% quando foi incorporado de 10 a 30% de fibras lignocelulósicas em compósitos com HDPE compatibilizados com MAPE (polietileno grafitizado com anidrido maleico). Esses valores aproximam-se daqueles encontrados para os compósitos com AC-573P, o que deve estar associado ao fato do copolímero utilizado pelos autores apresentar o mesmo teor de anidrido maleico que o AC-573P.

Comparando-se os valores de módulo elástico sob tração das misturas com mesmo teor de carga, verifica-se que aquelas com copolímero AC-575P ou AC-573P apresentaram maior valor de módulo do que as misturas sem copolímero. Para os compósitos contendo AC-575P, o módulo elástico mostrou-se ainda maior do que o dos compósitos com AC-573P.

Os copolímeros mostraram-se mais eficientes para as misturas com 20 e 30% em massa de carga. Para as formulações com 10% em massa de farinha de madeira e copolímero não se nota diferença significativa entre os valores do módulo elástico. Esse fato deve-se provavelmente a dificuldade no controle da temperatura e tempo de residência dos materiais na injetora, o que pode ter tido um efeito negativo sobre algumas propriedades mecânicas desses materiais.

Esse efeito no módulo elástico indica que os copolímeros AC-573P e AC-575P contribuíram, juntamente com a presença da farinha de madeira, para o aumento dos valores do módulo de elasticidade sob tração dos compósitos. Porém, o copolímero AC-575P teve uma contribuição maior para a propriedade do que o AC-573P.

A princípio a menor viscosidade do AC-573P poderia fazer com que esse copolímero atuasse de forma mais eficiente sobre o módulo dos compósitos do que o AC-575P. A viscosidade mais baixa do AC-573P faria com que, durante o processamento na extrusora, suas cadeias fluíssem mais facilmente entre as da matriz de HDPE, o que possivelmente tornaria mais efetivo o processo de ancoramento mecânico pelo emaranhamento das cadeias do copolímero e da matriz (CAULFIELD, 2005). Contudo, o que se observa é que o fator que atua predominantemente sobre o aumento do módulo elástico é o maior teor de anidrido maleico apresentado pelo AC-575P em relação ao AC-573P.

Apesar do melhor desempenho dos compósitos com copolímero em relação ao módulo elástico, apenas com a adição de farinha de madeira já foi possível obter ganhos significativos na propriedade.

O aumento do módulo elástico com a adição de AC-575P e AC-573P indica que esses copolímeros atuaram como agente de acoplamento nas misturas de HDPE com farinha de madeira.

5.3.1.2 - Resistência à Tração

A Figura 20 mostra o efeito da adição da farinha de madeira sobre a resistência à tração de formulações com e sem adição de copolímero de etileno e anidrido maleico.

Os compósitos sem adição de copolímero apresentaram um decréscimo na resistência à tração em relação a do HDPE puro (36 MPa) de aproximadamente 24, 28 e 34 % para as formulações com 10, 20 e 30% em massa de farinha de madeira, respectivamente. Nota-se, entretanto, que se aumentando o teor em massa de farinha de madeira de 10% para 20% ou para 30% há uma pequena diminuição na propriedade. Para as misturas contendo teor em massa de farinha de madeira de 10, 20 e 30%, os valores de resistência à tração foram de 27 MPa, 25,5 MPa e 23,5 MPa, respectivamente.

Estudos de Vianna e colaboradores (2004) afirmam que a incorporação de fibras vegetais em compósitos de matriz termoplástica diminui drasticamente a tenacidade, que é a capacidade do material absorver energia deformacional, podendo ser avaliada através de ensaios de tração e impacto. Segundo Fonseca (2005), a redução nos valores de tração no ponto de ruptura ocorre em função da redução da tenacidade do material com o aumento da concentração de esforços.

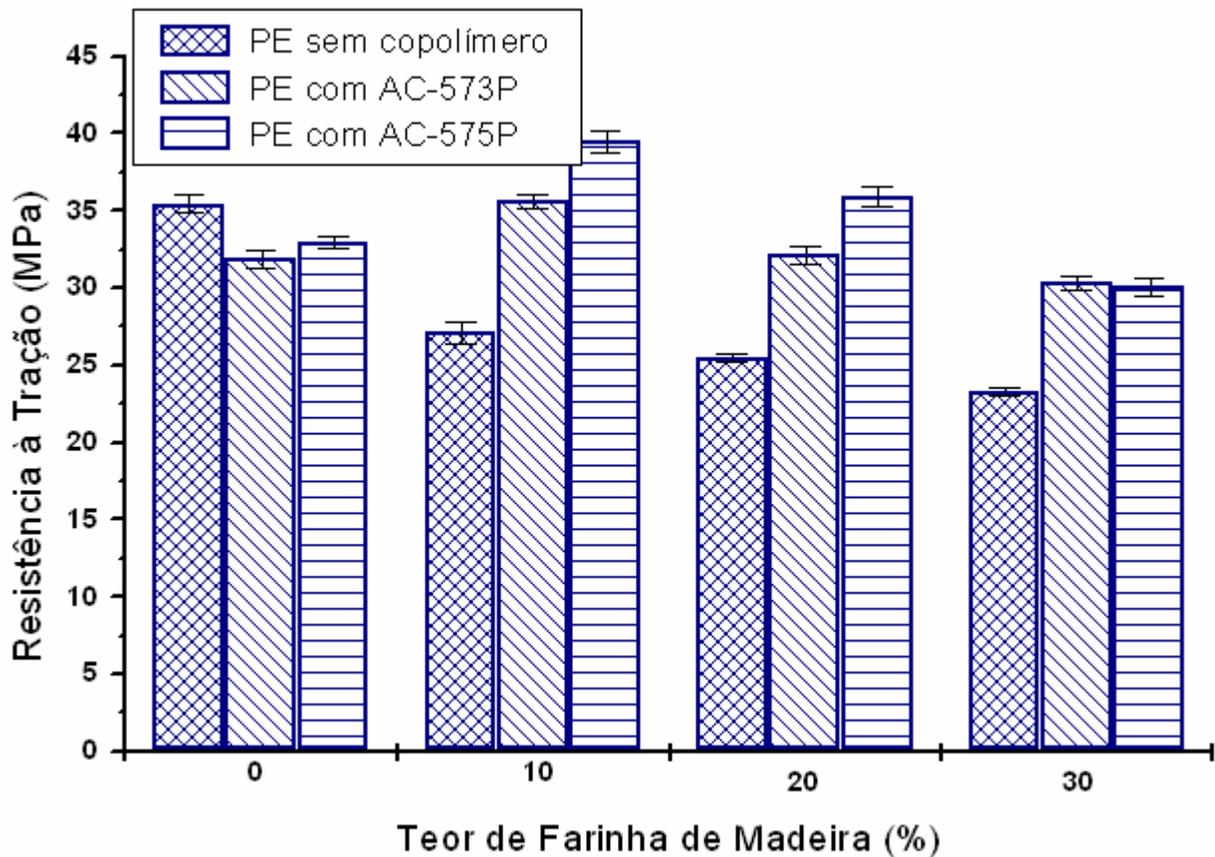


Figura 20: Resistência à tração dos compósitos com e sem adição de copolímero em função do teor de madeira

Para o compósito com AC-575P contendo 10% em massa de madeira houve um acréscimo na resistência à tração quando comparada a do HDPE com AC-575P sem carga. O valor da propriedade passou de aproximadamente 33 MPa no HDPE sem carga para 39 MPa no compósito com 10% em massa de farinha de madeira. Esse incremento representa um ganho de 18% na resistência à tração. O compósito com AC-575P e 20% em massa de farinha de madeira apresentou resistência à tração 9% maior do que o valor encontrado para o HDPE sem carga. Contudo, houve um decréscimo no valor da propriedade desse compósito quando comparado ao valor obtido para o compósito com 10% em massa de farinha de madeira. A resistência à tração diminuiu de 39 MPa no compósito com 10% em massa de carga para 36 MPa no compósito com 20% em massa de carga. A queda no valor da resistência à tração foi mais acentuada

no compósito com AC-575P e 30% em massa de farinha de madeira, cujo valor obtido para propriedade foi de aproximadamente 30 MPa.

A mistura com AC-573P e 10% em massa de farinha de madeira apresentou comportamento semelhante àquela com AC-575P de mesmo teor de carga, porém com diferença menos acentuada em relação ao valor da propriedade para o HDPE sem carga. A resistência à tração passou de 32 MPa no HDPE sem carga para 39,5 MPa no compósito com AC-573P e 10% em massa de farinha de madeira. O ganho de resistência à tração para esse compósito foi de aproximadamente 12%.

Para os compósitos contendo 20 e 30% em massa de carga, pode-se dizer que praticamente não houve variação na propriedade, com um acréscimo de menos de 1% para a formulação com 20% em massa de madeira e um decréscimo de 5% para formulação com 30% de madeira.

Resultados semelhantes foram encontrados por Yamaji (2004a), em seu trabalho utilizando resíduos de folhosas em matriz de polipropileno e compatibilizante MAPP. O autor verificou que o aumento de teor de serragem de 10 para 30% provocou uma diminuição na resistência à tração de 27 MPa para 23,5 MPa. Esse decréscimo na propriedade com o aumento do teor de carga foi atribuído à dificuldade em conseguir uma distribuição homogênea da carga nas condições experimentais utilizadas pelo autor.

Robin e Breton (2001) em seu trabalho com HDPE e serragem de *Picea sp.* encontraram um valor máximo na resistência à tração com 10% em massa de carga. Acima desse percentual, o valor da resistência à tração diminuiu com o aumento do teor de madeira.

Apesar da concordância entre os resultados desses autores quanto a um valor máximo de resistência à tração em compósitos com 10% em massa de madeira, outros estudos (HILLING, 2006, KARMARKAR, 2007, ORDEN, 2007) mostram que é possível obter um aumento na propriedade com teores de carga maiores.

Segundo Fonseca (2005), o fato da resistência à tração de compósitos plástico-madeira diminuir com a adição de madeira em alguns estudos, enquanto que para

outros demonstram o contrário pode ser atribuído a diferentes tipos de fibras, processos de tratamentos e técnicas de produção utilizadas.

Hiling (2006), em seu estudo de misturas de HDPE e resíduos de madeira compatibilizadas com MAPE, encontrou para a resistência à tração uma relação diretamente proporcional ao teor de madeira. A propriedade continuou aumentando com aumento da quantidade de carga, mesmo para teores de 50% de madeira.

Além do efeito do teor de farinha de madeira na resistência a tração dos compósitos, pode-se observar também na Figura 19, o efeito da presença dos copolímeros AC-575P e AC-573P nas formulações com mesmo teor de farinha de madeira.

É possível verificar que houve um acréscimo na resistência à tração nos compósitos com copolímero AC-575P e AC-573P, em relação às formulações sem aditivo de mesmo teor de carga.

O incremento na propriedade foi maior para as formulações contendo AC-575P com 10 e 20% em massa de carga, sendo o melhor resultado apresentado pela formulação com 10% em massa de farinha de madeira. A resistência à tração para os compósitos com AC-575P com teor em massa de carga de 10 e 20% foi de 39,5 MPa e 36 MPa, respectivamente. Já para os compósitos com teor em massa de carga de 10 e 20% e AC-573P, esses valores foram de 35,7 MPa e 32,2 MPa, respectivamente.

As formulações contendo copolímero AC-575P e AC-573P com 30% em massa de carga também apresentaram maior valor para a resistência à tração que o da formulação sem copolímero e mesmo teor de carga. Contudo, a diferença entre os valores da propriedade para os compósitos com copolímero AC-575P e AC-573P foi irrelevante entre si. Ambos apresentaram resistência à tração em torno de 30 MPa.

Os aumentos de resistência à tração, observados nas amostras preparadas com copolímero em relação àquelas sem copolímero, indicam uma melhor transferência de tensão da matriz para o reforço lignocelulósico na interface polímero-madeira. Esse melhor desempenho é provavelmente decorrente de uma ocorrência de ancoramento mecânico entre as cadeias poliméricas da matriz e dos copolímeros e de interações químicas entre os grupos anidrido e as hidroxilas da celulose e lignina (RAZZINO, 2004;

YAMAJI, 2004a). Contudo, o aumento do teor de farinha de madeira apresentou, de modo geral, um efeito negativo nos valores de resistência à tração.

5.3.1.3 - Alongamento na Ruptura

Os resultados de alongamento na ruptura para as formulações com e sem adição de copolímero de polietileno e anidrido maleico encontram-se na Figura 21.

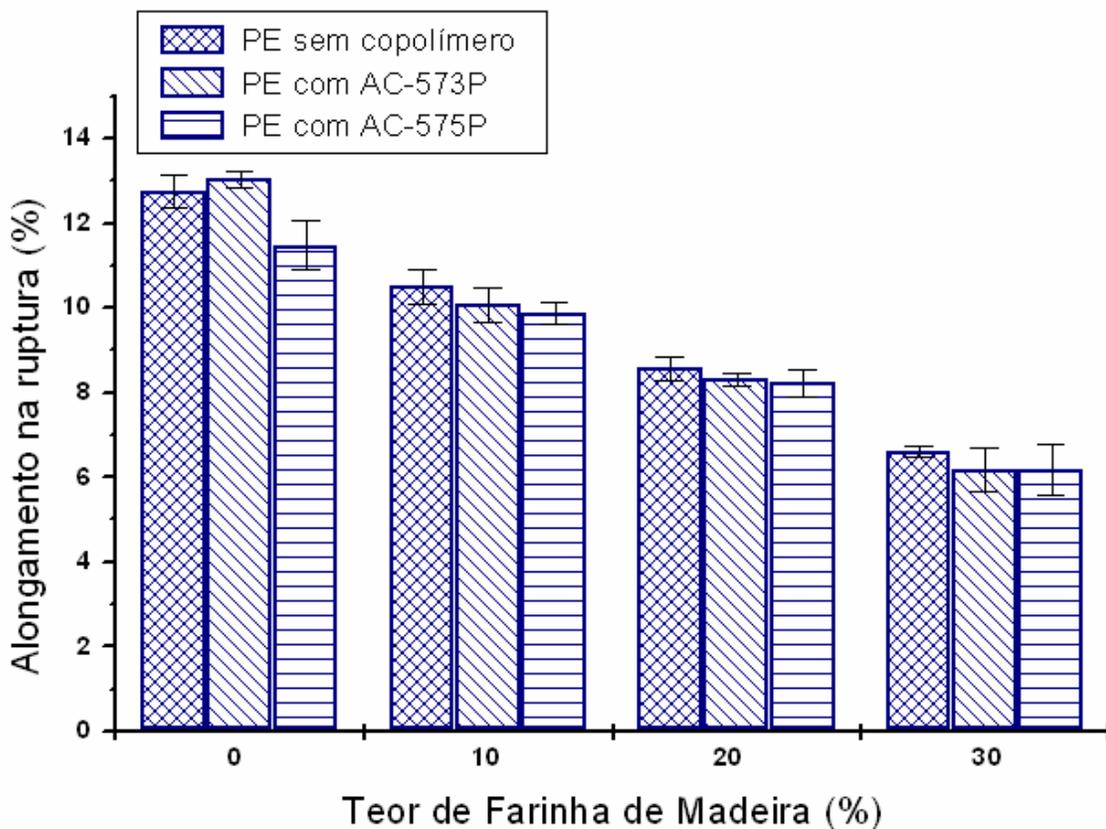


Figura 21: Alongamento na ruptura dos compósitos com e sem copolímero em função do teor de madeira

Observa-se que a adição de farinha de madeira reduz o alongamento na ruptura nas formulações com e sem a adição de agente de acoplamento.

Nas misturas sem copolímero com teor em massa de carga de 10, 20 e 30% de carga nota-se uma diminuição no alongamento na ruptura de 18, 33 e 48%, respectivamente, em relação ao HDPE. O alongamento na ruptura para o HDPE puro foi de aproximadamente 13%.

Os compósitos com AC-573P e teor em massa de farinha de madeira de 10, 20 e 30% apresentaram, respectivamente, uma diminuição de 23, 36 e 53% no alongamento na ruptura em relação ao HDPE. Para o alongamento na ruptura do HDPE extrusado com AC-575P foi encontrado o valor de 13%.

Já a diminuição promovida no alongamento na ruptura dos compósitos com AC-575P com teor em massa de carga de 10, 20 e 30% foi, respectivamente, de 14, 28 e 59% em relação ao HDPE. O HDPE com AC-573P apresentou um alongamento na ruptura de aproximadamente 11%.

Esses resultados podem ser explicados pela diminuição da mobilidade das cadeias poliméricas causada pela presença de partículas de madeira, o que reduz a capacidade de deformação da matriz e também pelo baixo alongamento na ruptura das partículas da carga. Esse comportamento é típico de plásticos reforçados, em geral, tem sido reportado por pesquisadores (BLEDZKI, 1999; FELIX, 1991).

Enquanto o aumento do teor de carga apresenta um efeito bastante considerável na diminuição do alongamento na ruptura, a adição de agente de acoplamento não apresenta influência significativa na propriedade como pode ser verificado na Figura 20.

Alguns autores (AMIM, 2006; KARMARKAR, 2007; ORDEN, 2007) em seus trabalhos sobre compósitos reforçados com cargas lignocelulósicas encontraram resultados semelhantes, nos quais o alongamento na ruptura é afetado pela adição da carga e apresenta pouca variação para compósitos compatibilizados em comparação com àqueles sem adição de compatibilizante.

Contudo, Bengtsson e colaboradores (2007) relatam que a adição de poliolefina graftizada com anidrido maleico em compósitos plástico-madeira pode conduzir a redução no alongamento na ruptura. Segundo os autores, esse efeito seria provocado pela melhora na adesão interfacial nos compósitos, o que causa restrição na movimentação das cadeias poliméricas.

5.3.2 - Propriedades sob Flexão

As propriedades sob flexão analisadas nesse trabalho foram resistência à flexão e módulo de elasticidade.

5.3.2.1 - Módulo de Elasticidade sob flexão

Os resultados do módulo de elasticidade sob flexão para as formulações com e sem a presença de copolímero de etileno e anidrido maleico estão expressos na Figura 22.

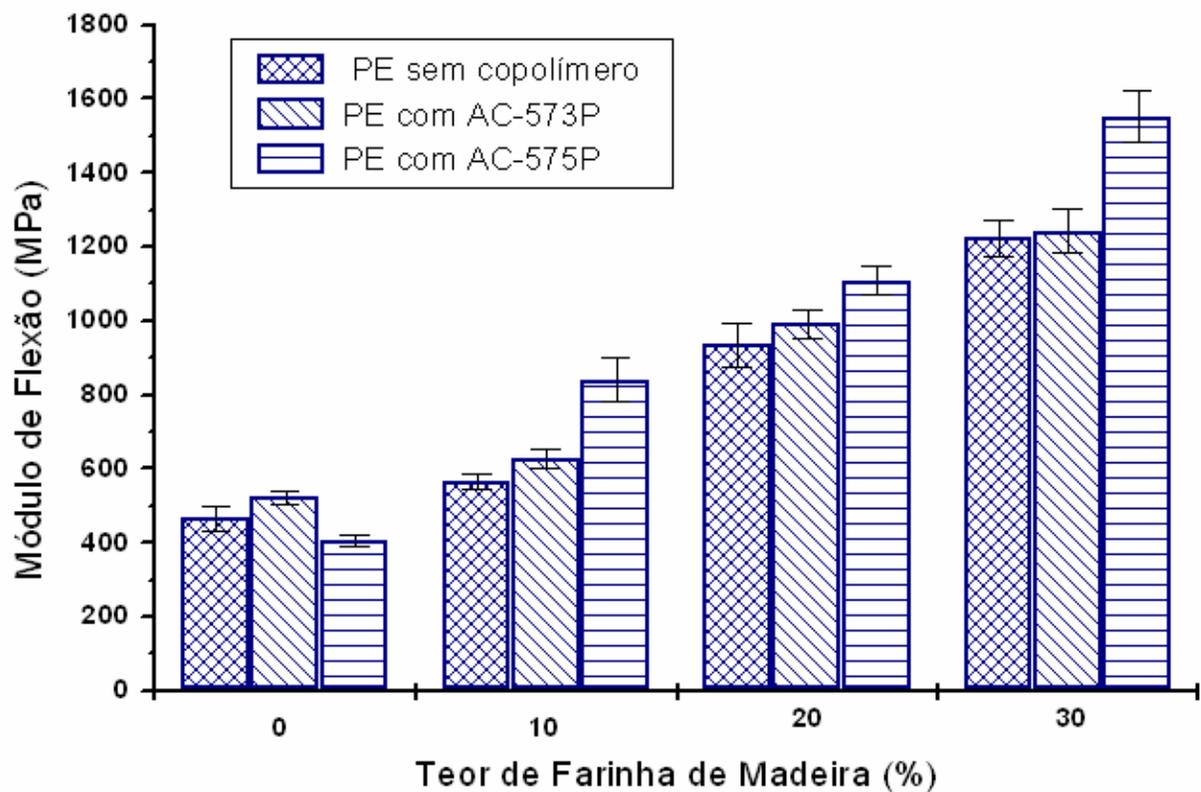


Figura 22: Módulo sob flexão dos compósitos com e sem copolímero em função do teor de madeira

Analisando-se a Figura 22, nota-se o acréscimo no módulo de flexão promovido pelo aumento do teor de farinha de madeira nas formulações sem copolímero. Para as formulações contendo 10, 20 e 30% em massa de farinha de madeira houve um aumento de aproximadamente 22%, 50% e 162%, respectivamente, em relação ao polímero puro. O HDPE puro apresentou módulo elástico sob flexão de 466 MPa.

Os resultados mostram que a adição da carga de madeira contribui grandemente para o aumento do módulo, mesmo em composições sem a adição de copolímero.

Esse fato sugere que o aumento da concentração da farinha de madeira reduz a mobilidade das cadeias da matriz polimérica, levando ao aumento no módulo sob flexão dos compósitos, visto que diminui a capacidade de deformação do material quando submetido à flexão, afetando a propriedade de maneira inversa como ocorreu com o alongamento na ruptura dos materiais.

É possível verificar que o módulo sob flexão também aumentou nas composições com AC-575P e AC-573P, assim como naquelas sem copolímeros. Entretanto, o copolímero AC-573P apresentou valores de módulo próximos aos apresentados pelas formulações somente com carga. Já o copolímero AC-575P promoveu aumentos no módulo mais significativos quando comparados aos demais compósitos, indicando uma maior eficiência na compatibilização de compósitos plástico-madeira do que o AC-573P.

O módulo dos compósitos com AC-575P com 10, 20 e 30% em massa de carga apresentou um aumento de, respectivamente, 106, 170, 280% em relação ao da formulação sem farinha de madeira (408 MPa). Os valores maiores de módulo de flexão para as formulações com AC-575P em comparação aos materiais sem aditivo, mostram que tanto o teor de farinha de madeira quanto a presença de copolímero exercem influência nessa propriedade.

Diferentemente do que pôde ser observado no módulo elástico sob tração que aumentou com a adição dos copolímeros AC-575P e AC-573P, o incremento no módulo elástico sob flexão somente ocorreu para os compósitos com AC-575P.

5.3.2.2 - Resistência à Flexão

O comportamento da resistência à flexão em função da presença de farinha de madeira nas formulações com e sem copolímero está ilustrado nas Figuras 23.

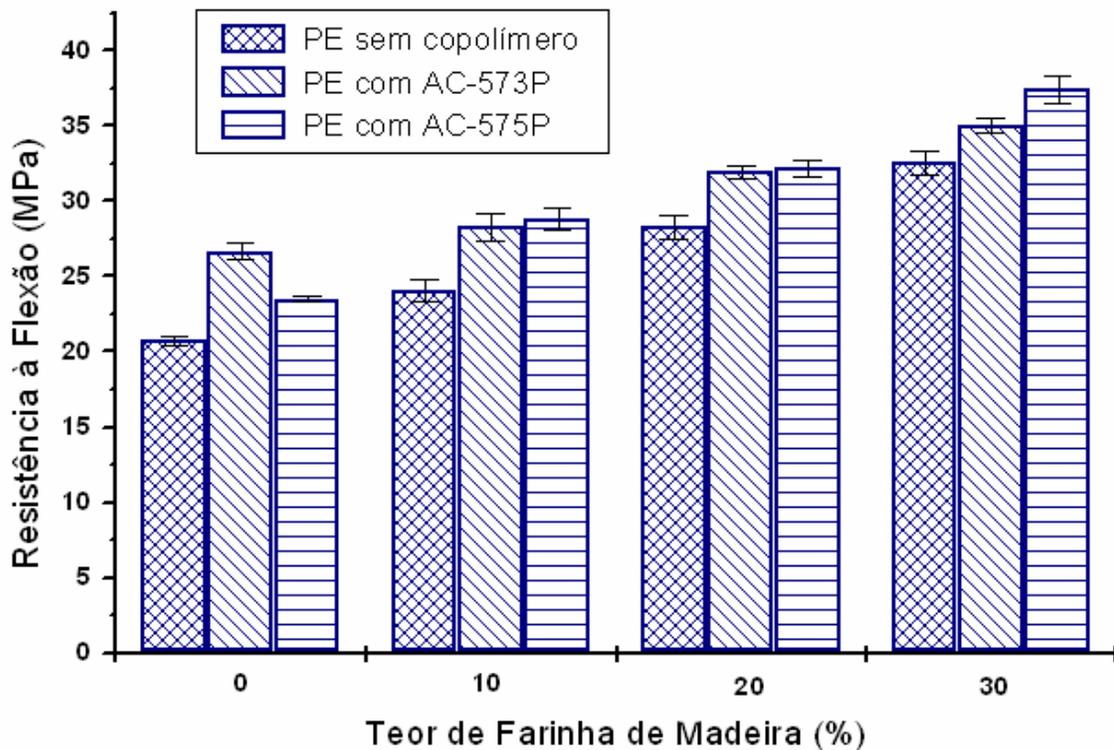


Figura 23: Resistência à flexão dos compósitos com e sem copolímero em função do teor de madeira

Nas formulações sem copolímero houve um acréscimo de aproximadamente 16, 36, 72% na resistência à flexão dos compósitos contendo, respectivamente, 10, 20 e 30% em massa de fibra de madeira quando comparados com o polietileno extrusado sem adição de carga (20,7 MPa).

Para os compósitos com AC-575P, os valores de resistência à flexão aumentaram 22, 37, 59% para as composições com 10, 20 e 30% em massa de carga, respectivamente, em relação ao HDPE. Os valores da propriedade aumentaram 6, 20 e 31%, respectivamente, em relação ao HDPE, para as misturas com os mesmos teores de carga e AC-573P. O polímero sem carga com AC-575P e AC-573P apresentaram resistência à flexão de 23,5 e 26,7 MPa, respectivamente.

Comparando-se as formulações de mesmo teor de farinha de madeira, nota-se que aquelas com AC-575P ou AC-573P apresentaram valores maiores para a resistência à flexão do que as misturas sem copolímero. Os resultados de resistência à flexão dos compósitos com AC-575P e AC-573P com mesmo teor de carga apresentaram valores muito próximos.

Bengtsson e colaboradores (2007) encontraram diferenças significativas na resistência à flexão de compósitos de polipropileno e fibras de celulose compatibilizados e não compatibilizados. Os autores observaram um aumento na resistência à flexão para os compósitos não-compatibilizados com teor de carga a até 50%. A partir desse teor de carga, a propriedade começou a diminuir para as misturas não compatibilizadas e continuou aumentando juntamente com teor de fibra para os compósitos compatibilizados com MAPP (polipropileno graftizado com anidrido maleico).

Contudo, pelos resultados presentes na Figura 23, nota-se que até o teor máximo de carga de madeira em estudo, foi possível obter ganho na resistência à flexão mesmo nas misturas sem copolímero.

5.3.3 - Dureza

A dureza pode ser definida como a resistência oposta à penetração de uma superfície com dimensões e carga determinadas (MANO, 1991).

A dureza dos materiais processados com e sem a adição de copolímero de etileno e anidrido maleico encontra-se no O Quadro 9.

A análise dos resultados para dureza mostra que houve um acréscimo na propriedade dos compósitos com e sem adição de copolímero com o aumento da adição de farinha de madeira.

Quadro 9: Dureza dos compósitos plástico-madeira com e sem copolímeros de etileno e anidrido maleico

MATERIAL	DUREZA SHORE D
PE	61,5 ± 0,2
PE10W	62,2 ± 0,3
PE20W	62,3 ± 0,4
PE30W	63,7 ± 0,6
PE-573P	61,2 ± 0,2
PE10W-573P	62,9 ± 0,4
PE20W-573P	63,5 ± 0,4
PE30W-573P	64,5 ± 0,5
PE-575P	60,5 ± 0,3
PE10W-575P	62,3 ± 0,3
PE20W-575P	63,8 ± 0,2
PE30W-575P	64,7 ± 0,3

O efeito de incremento na dureza com o aumento do teor de carga mostrou-se semelhante nas formulações extrusadas com e sem a presença de copolímero. Contudo, a dureza dos compósitos com copolímeros AC-575P ou AC-573P apresentou-se um pouco maior que os sem copolímero.

A dureza dos compósitos seguiu a mesma tendência das propriedades mecânicas de crescimento com o aumento do teor de madeira, exceto com a resistência à tração.

Hilling (2006) encontrou para dureza de compósitos de HDPE e resíduos de madeira uma relação direta entre o aumento da propriedade e o aumento do teor de carga. Nesse estudo, foram utilizados diferentes resíduos de madeira (*pinus*, MDF (*Medium density fiberboard*) e garapeira) e, para cada um deles encontrou-se valores de dureza mais elevados com aumento do teor de carga. Porém, o resíduo de garapeira apresentou valores maiores de dureza quando comparados aos obtidos para os outros resíduos. O autor associa esses resultados com a maior densidade da madeira dessa espécie em relação ao *pinus* e ao MDF.

Essa mesma relação entre a dureza e as demais propriedades mecânicas foi observada por Caraschi e Leão (2002) que encontraram para compósitos de polipropileno e farinha de madeira, um aumento na dureza e de outras propriedades mecânicas dos materiais com aumento do teor de carga. Os autores testaram formulações com, 15, 25 e 40% em massa de madeira com dois tamanhos diferentes de partículas (90 e 1040 mesh). Os resultados mostraram que não houve correlação entre o tamanho das partículas e a dureza.

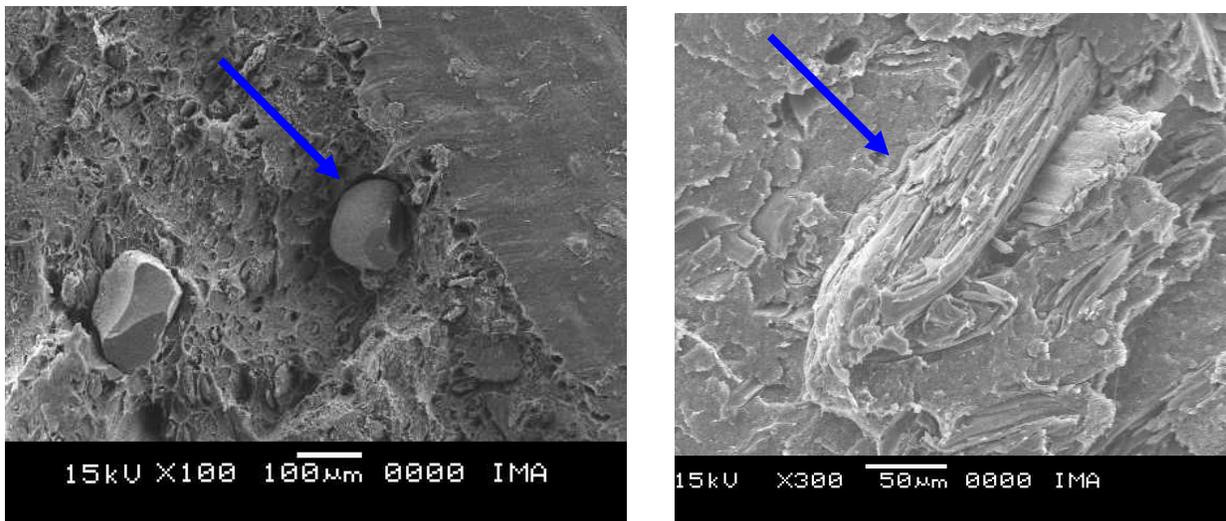
O fato da dureza dos compósitos apresentar uma correlação significativa com o alongamento e o módulo elástico, tanto dos ensaios de tração como de flexão, constitui um indicativo de que a capacidade do material sofrer deformação depende da dureza. Um aumento da dureza corresponde a uma diminuição do alongamento, bem como, um aumento da dureza corresponde a um aumento do módulo elástico. Dessa forma, pode-se dizer que força necessária para deformar um material aumenta com o aumento de sua dureza.

5.4 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A seguir são apresentadas algumas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura de amostras dos compósitos WPC.

Através dessa técnica foi possível avaliar a eficiência do processo de dispersão da carga celulósica na matriz termoplástica e a capacidade de molhamento da superfície da fibra pela resina.

As imagens apresentadas nas Figuras 24 e 25 mostram que os copolímeros de etileno e anidrido maleico possibilitam uma melhoria da adesão interfacial entre as partículas de madeira e a matriz polimérica em relação aos compósitos sem adição de copolímero AC-575P ou AC-573P.



(a) PE10W

(b) PE10W- 575P

Figura 24: Micrografias de MEV dos compósitos de HDPE/WF (a) sem agente de acoplamento e (b) com agente de acoplamento

A Figura 24 (a) mostra a micrografia do compósito com 10% em massa de farinha de madeira sem copolímero. Nota-se que as partículas de madeira apresenta-se desprendidas da matriz polimérica. Já na Figura 24 (b) encontra-se a micrografia do compósito com 10% em massa de farinha de madeira e copolímero AC-575P. Observa-se, nesse caso, uma maior aderência da carga celulósica na matriz de HDPE. Assim, pode-se dizer que houve uma melhora na adesão entre as fases polímero-madeira, o

que confirma que o copolímero AC-575P atuou como agente de acoplamento nos compósitos.

Essa maior adesão refletiu nas propriedades mecânicas dos compósitos, em especial no módulo de flexão e de tração que apresentaram incrementos significativos em seus valores com o uso do copolímero AC-575P. A única propriedade que não sofreu influência significativa da adição do copolímero foi o alongamento na ruptura. As demais propriedades foram influenciadas de forma positiva com o uso do copolímero AC-575P.

Alguns autores obtiveram resultados semelhantes quanto à melhora na adesão interfacial pelo uso de poliolefinas graftizadas com anidrido maleico (HILLING, 2006; LEI, 2007; YAMAJI, 2004; YANG, 2007).

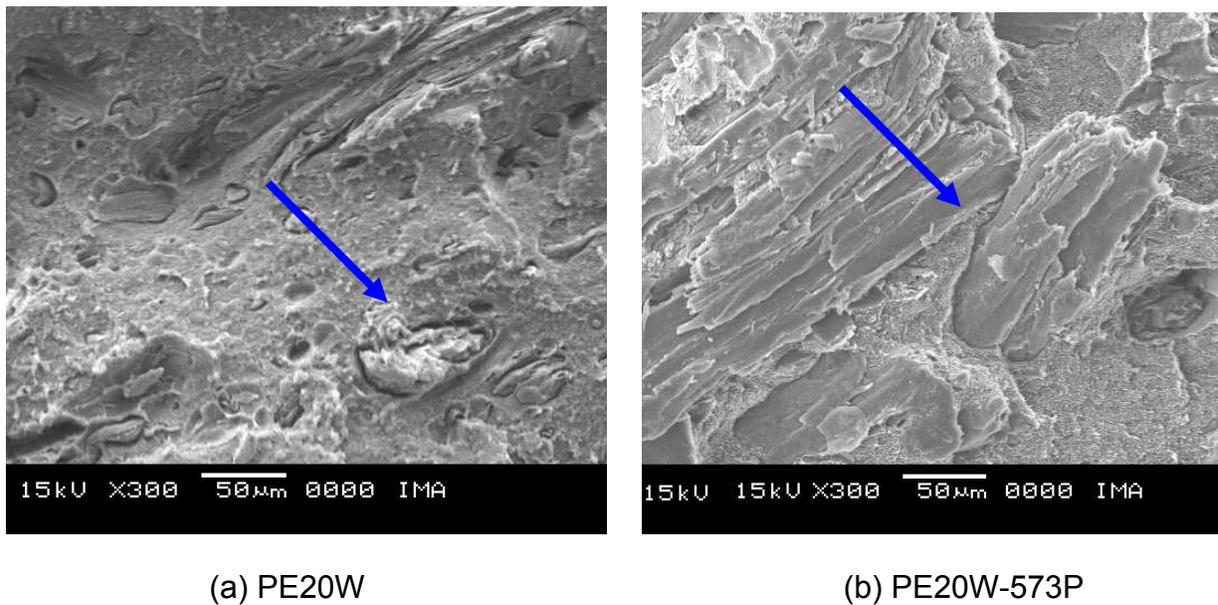


Figura 25: Micrografias de MEV dos compósitos de HDPE/WF (a) sem agente de acoplamento e (b) com agente de acoplamento

A Figura 25 (a) apresenta a micrografia do compósito com 20% em massa de farinha de madeira sem copolímero. Assim como na micrografia do compósito sem copolímero e 10% em massa de carga, nessa imagem também é possível notar que as partículas de madeira não se apresentam totalmente aderidas na matriz polimérica.

A Figura 25 (b) traz a micrografia do compósito com 20% em massa de carga e copolímero AC-573P. Nota-se que houve uma melhor adesão interfacial no compósito com AC-573P em comparação com aquele sem compatibilizante de teor de carga.

Esse resultado está em acordo com os encontrados para as propriedades mecânicas dos compósitos. Embora os compósitos com AC-573P tenham apresentado, de maneira geral, melhor desempenho mecânico do que aqueles sem copolímero, o uso de AC-575P gerou aumentos maiores nas propriedades mecânicas.

As imagens apresentadas mostram que os copolímeros AC-575P e AC-573P possibilitam uma melhoria da adesão interfacial entre a madeira e a matriz termoplástica. As imagens corroboram os resultados obtidos nos testes mecânicos, nos quais as amostras com copolímeros apresentaram um incremento de resistência em relação às composições sem copolímeros.

5.5 - CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA

No Quadro 10 são apresentadas as entalpias relativas à primeira fusão, segunda fusão e cristalização, juntamente com suas temperaturas, para os copolímeros, HDPE e compósitos produzidos.

Observando-se o Quadro 10, nota-se que os valores das temperaturas de fusão referentes ao primeiro e segundo ciclo de aquecimento sofreram poucas alterações, quando comparadas ao HDPE sem carga de farinha madeira. Contudo, as amostras quando foram submetidas ao segundo aquecimento re-organizaram suas estruturas e apresentaram uma variação de entalpia maior do que no primeiro aquecimento.

Quadro 10: Valores de Entalpia e de Temperatura para a primeira e segunda fusão e Cristalização dos Compósitos

Amostra	T_{m1}(°C)	T_{cc} (°C)	T_{m2} (°C)
AC-575P	98	90	101
AC-573P	148	106	143
PE	137	120	135
PE10W	136	118	136
PE20W	137	118	136
PE30W	134	118	136
PE-573P	135	121	134
PE10W-573P	135	118	136
PE20W-573P	138	118	136
PE30W-573P	135	117	136
PE-575P	135	121	135
PE10W-575P	134	119	135
PE20W-575P	134	118	135
PE30W-575P	135	119	134

T_{m1} = temperatura de fusão no primeiro aquecimento;

T_{cc} = temperatura de cristalização no resfriamento;

T_{m2} = temperatura de fusão no segundo aquecimento;

A temperatura de fusão cristalina está diretamente associada ao tamanho dos domínios cristalinos o qual pode ser influenciado pela presença da carga celulósica. Para os compósitos plástico-madeira, a temperatura de fusão (T_{m1} e T_{m2}) não foi significativamente afetada pela presença da carga de madeira. Segundo Pasquini (2008), esse comportamento constitui um indicativo de que o tamanho dos domínios cristalinos não sofreu alteração na matriz.

Com relação às temperaturas de cristalização para os compósitos, foram observadas pequenas variações, fato que pode estar correlacionado com pequenas alterações na cristalinidade do HDPE.

A temperatura de cristalização apresenta um leve decréscimo com a adição de farinha de madeira, tanto para os compósitos com aditivo como para os sem aditivo. A presença do copolímero AC-575P ou AC-573P não altera a temperatura de cristalização. A partir desses resultados, pode-se sugerir que a cristalinidade dos materiais não é significativamente influenciada pela presença do polímero funcionalizado com anidrido maleico.

Lei e colaboradores (2007) observaram uma redução na temperatura de cristalização com o aumento do teor de carga em compósitos com HDPE e fibra de madeira. Os autores associam essa diminuição na temperatura de cristalização, a um aumento na viscosidade do HDPE na temperatura de cristalização provocada pela adição de madeira devida à baixa capacidade de escoar do HDPE puro. A taxa de difusão das cadeias de HDPE diminui e como resultado a T_{cc} torna-se menor, e a taxa de cristalização diminui.

5.6 - RESUMO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS

O resumo das propriedades mecânicas dos compósitos WPC compatibilizados e não compatibilizados estão descritas no Quadro 11.

Quadro 11: Resumo das propriedades mecânicas dos compósitos plástico-madeira

Materiais	PE/WF	PE/WF/573P	PE/WF/575P
Propriedades			
Módulo de Tração	Variou de 689 MPa a 1062 MPa nos compósitos com teor em massa de carga entre 0 e 30%.	O módulo variou de 773 MPa a 1297 MPa nos compósitos com teor em massa de WF de 0 e 30%.	O módulo variou de 711 MPa a 1510 MPa nos compósitos com teor em massa de carga entre 0 e 30%.
Alongamento na ruptura	Redução pronunciada no alongamento na ruptura com aumento do teor de carga. Variou entre 13-6,5%	A adição de AC-573P não teve influência significativa na propriedade	A adição de AC-575P não teve influência significativa na propriedade
Resistência à Tração	A resistência à tração diminuiu com aumento do teor de WF. Os valores variaram de 35,5 MPa a 23,3 MPa.	Aumentou no compósito com 10 % de WF (35,7 MPa). O compósito com 20% de WF apresentou valor próximo ao HDPE sem WF. O compósito com 30% de WF teve o valor 30,3 MPa.	Aumentou nos compósitos com 10 e 20% de WF. O material com 10% de WF teve o valor maior (39,5 MPa) e o com 30% de WF apresentou o valor mais baixo (30,1 MPa).
Módulo de Flexão	Aumentou com o aumento do teor de WF. Os valores variaram de 466 MPa a 1224 MPa	Aumentou com o aumento do teor de WF. Os valores variaram de 522,5 MPa a 1243 MPa	Aumentou com o aumento do teor de WF. Os valores variaram de 408 MPa a 1553 MPa
Resistência à Flexão	Aumentou com aumento do teor de carga de 20,7 MPa a 32,5 MPa.	Apresentou a mesma tendência que a dos compósitos não – compatibilizados. Porém, o aumento na propriedade foi mais pronunciado.	Próxima a dos compósitos com AC-573P. Exceto para o compósito com 30% de WF que apresentou o melhor desempenho. (37,5 MPa)
Dureza Shore D	Aumentou com o teor de WF. Variou entre 61,5 e 63,7	Os resultados foram levemente maiores do que os dos compósitos sem copolímeros	Aumentou com o aumento do teor de carga de forma semelhante aos dos compósitos com AC-573P

5.7 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DE MADEIRAS PLÁSTICAS COMERCIAIS E AS DOS COMPÓSITOS WPC

Existem no mercado diversos produtos utilizados como madeira plástica com composições e propriedades distintas. Algumas propriedades mecânicas dessas madeiras plásticas são apresentadas no Quadro 12, onde estão presentes também as propriedades dos compósitos WPC com agente de acoplamento AC-575P obtidos nessa dissertação.

Comparando-se as propriedades mecânicas dos materiais nota-se que em alguns casos os compósitos WPC com AC-575P apresentaram desempenho muito próximo ou superior ao dos produtos comerciais.

Entre os valores de módulo de tração encontrados no Quadro 12, o compósito PE30W-575P foi o que apresentou maior valor da propriedade. Já o compósito PE10W-575P apresentou o menor valor de módulo (978 MPa), o qual mostrou-se próximo ao do material produzido pela PLASTNEW (953 MPa) que é feito a partir de HDPE virgem e 50% de fibras de MDF (HILLING, 2006)

O maior módulo de flexão de produto comercial foi apresentado pelo compósito de HDPE com fibra de vidro da TRIMAX (TRIMAX, 2008) seguido do compósito WPC com 30% de farinha de madeira (PE30W-575P) que apresentou o maior valor de módulo de flexão entre os compósitos WPC. O valor do módulo do compósito PE30W-575P mostrou-se próximo ao valor do compósito da PLASTNEW (HILLING, 2006).

Os compósitos WPC obtidos nessa dissertação apresentaram valores de resistência à tração superiores aos mostrados por todas as madeiras plásticas comerciais. Já o maior valor de resistência à flexão foi o do compósito PE30W-575P e o menor valor foi apresentado pelo PE10W-575P

De modo geral os compósitos WPC obtidos experimentalmente a partir dessa dissertação apresentaram propriedades mecânicas próximas ou superiores aos produtos comerciais, sendo o compósito PE30W-575P aquele que exibiu o melhor desempenho mecânico em relação aos outros materiais apresentados no Quadro 12.

Quadro 12: Propriedades mecânicas dos compósitos obtidos nessa dissertação e madeiras plásticas comerciais

Produto	Material	Módulo tração (MPa)	Módulo flexão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Dureza Shore D
PE10W-575P	HDPE/ WF	978	840	40	28	62
PE20W-575P	HDPE/ WF	1289	1109	35	32	63
PE30W-575P	HDPE/ WF	1510	1553	30	35	64
Compósito WPC Plastnew ⁽¹⁾	HDPE virgem + 50% Fibras de MDF	953	1550	19	30	67
Earth Care ⁽²⁾ Recyclemaid	HDPE reciclado	–	641-706	17-18	–	64-65
Lumber Last ⁽³⁾	HDPE reciclado	–	965	10	–	
Plastic Lumber Trimax ⁽⁴⁾	HDPE/ Fibra de vidro	–	3102	8-9	–	60
Superwood Selma ⁽⁵⁾	HDPE/ LDPE	–	1008	12-13	–	–
Duraboard ⁽⁶⁾	Resíduos plásticos/ Serragem	1100	1000	2	12	–

Fonte: ⁽¹⁾ HILLING (2006), ⁽²⁾ BRESLIN (1998), ⁽³⁾ BRESLIN (1998) ⁽⁴⁾ TRIMAX (2008), ⁽⁵⁾ ZARILLO, 1995, ⁽⁶⁾ CARROL (2001)

6 - CONCLUSÕES

Compósitos de HDPE reforçados com 10, 20 e 30% em massa de farinha de cedro foram obtidos em extrusora dupla-rosca co-rotacional pelo método *pre-dry split feed*, o qual se utiliza a farinha de madeira pré-seca e alimentação do polímero em separado.

A utilização de farinha de cedro em compósitos permite obter ganhos significativos nas propriedades mecânicas em comparação ao polímero puro. Dentre as propriedades mecânicas estudadas, a que mais sofreu influência da adição de madeira foi o módulo elástico sob flexão, que alcançou um aumento de aproximadamente 160% para o compósito com 30% em massa de farinha de madeira em relação ao módulo do polímero puro.

O uso de agente de acoplamento comercial, um polímero a base de etileno e anidrido maleico, foi eficaz para promover melhor adesão entre a farinha de cedro e o HDPE e melhorou as propriedades mecânicas dos compósitos. O agente de acoplamento com maior teor de anidrido maleico (3% em massa) conduziu a melhores resultados mecânicos de modo geral. Entretanto, para o alongamento na ruptura a adição de agente de acoplamento mostrou-se pouco significativo em termos de melhoria da propriedade. A resistência à tração aumentou somente para os compósitos com agente de acoplamento e 10% de teor em massa de farinha de madeira. A resistência à flexão apesar de ter aumentado com o teor de madeira e presença de agente de acoplamento, somente houve um ganho elevado na propriedade da composição com 30% em massa de farinha de madeira e agente de acoplamento com alto teor de anidrido maleico.

Deste modo pode-se concluir que, dependendo da propriedade mecânica, com a adição de farinha de madeira já seria possível obter bons resultados para as propriedades dos compósitos, tornando-se desnecessário o uso de agente de acoplamento.

A análise comparativa entre as propriedades os compósitos obtidos nesse trabalho e as das madeiras plásticas comerciais, mostrou que os materiais em estudo

apresentam propriedades semelhantes e até mesmo superiores aos dos produtos comerciais.

7 - SUGESTÕES

- ✓ Avaliar o efeito de diferentes granulometrias da carga de madeira sobre as propriedades dos compósitos;
- ✓ Avaliar novas condições de processamento incluindo perfis de roscas;
- ✓ Realizar testes de resistência à compressão, ao impacto, além de outros testes realizados na madeira plástica como arrancamento de parafuso e absorção de água;
- ✓ Testar formulações com diferentes percentuais e tipos de agente de acoplamento, como peróxidos e silanos;
- ✓ Utilizar resíduos provenientes de diferentes espécies de madeira, bem como outras fibras naturais, como a folha do abacaxi, da bananeira, da cana-de-açúcar em compósitos termoplásticos.

8 - RERÊNCIAS

ABDELLAH, A.; UTRACKI, L.A. Interphase and Compatibilization of Polymer Blends. **Polymer Engineering and Science**, v.36, n. 12, p. 1574-1585, 1996.

ABREU, P. H. F. **Aproveitamento dos resíduos da madeira**. 2005. 46 p. Monografia, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, PR.

ACWAX-HONEYWELL. **Typical properties of ACWAX products**. Disponível em: <http://www.acwax.com/index.html>. Acesso em: 2 fev. 2008.

ADHIKARY K.B.; PANG, S.; STAIGER, M.P. Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with *Pinus radiata* sawdust. **Chemical Engineering Journal**, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com> >. Acesso em: 10 mai. 2008.

AMBIENTEBRASIL. **Plásticos**. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/reciclagem/plastico.html> Acesso em: 20 nov. 2007.

AMIM, P. R. P. **Estudo de misturas de HDPE e fibra de coco como mecanismo de desenvolvimento limpo para utilização em madeira plástica**. 2006. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2006. Orientadora: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco.

ARIMA, E.; VERÍSSIMO, A.; SOUZA JR, A. Atividade Madeireira e Desmatamento na Amazônia. IICA – Embrapa, 56p 1999.

ASHORI, A. Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries! **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4661–4667, 2008.

ASPECTS OF WOOD AS A COMPONENT OF THERMOPLASTIC COMPOSITES. **Manufacturing News Directory - Plastics News**. Jul. 2003. Disponível em:

<http://www.jobwerx.com/news/Archives/thermoplastic_composites_2003_news_07_13_03.html>. Acesso: 20 out. 2007.

ASTM (American Society for Testing and Materials) D6662 - Standard specification for polyolefin-based plastic lumber decking boards, USA, 2001, 14p.

_____D 790 - Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced plastics and Electrical Insulating Materials, USA, 1992

_____D 638 – Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, USA, 1984. 26p.

_____D 1348-61 - Standard Test Methods for Moisture in cellulose, USA, 1961.

IBAMA. **Banco de dados de madeiras brasileiras**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira/caracteristicas.php?ID=59&caracteristica=207>>. Acesso em: 20 abr 2008.

BANKS, A.D. Aproveitamento de resíduos da indústria da madeira. **Revista da Madeira**, n. 69, p.28-30, 2003.

BEG, M. D. H.; PICKERING, K. L. Fiber pretreatment and its effects on wood fiber reinforced polypropylene composites. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 21, n. 3, p. 303-307, 2006.

BENGTSSON, M.; BAILLIF, M.; OKSMAN, K. Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fibre–polypropylene composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, p. 1922–1931, 2007.

BENGTSSON, M.; OKSMAN, K. Silane crosslinked wood plastic composites: Processing and properties. **Composites Science and Technology**, v. 66, n. 13, p. 2177-2186, 2006.

BISMARCK, A., BALTAZAR-Y-JIMENEZ, A., SARLKAKIS, K. Green composites as Panacea? Socio-economic aspects of green materials. **Environment. Development and Sustainability**, v.8, n.3, p. 445–463, 2006.

BLEDZKI, A. K.; LETMAN, M.; VIKSNE, A.; RENCE, L. A. A comparison of compounding processes: and wood type for wood fibre-PP composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, p.789-797, 2005.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v.24, p.221-274, 1999.

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**, v.55, n.1, p.13-16, 1997.

BONONI, V. L. R. Zigomicetos, Basidiomicetos e Deuteromicetos: noções básicas de taxonomia e aplicações biotecnológicas. São Paulo: Instituto de Botânica, Secretaria do Meio Ambiente, 1999.184p.

BRAND, M. A.; SILVA, D. A.; MUÑIZ, G. I. B.; KLOCK, U. Balanço e rendimento energéticos de uma indústria integrada de base florestal. **Floresta e Ambiente**, v. 09, n. 01, p. 45-53, 2002.

BRANDT, C. W.; FRIDLEY, K. J. Effect of load rate on flexural properties of wood-plastic composites. **Wood and Fiber Science**, v.35, n.1, p.135-147, 2003.

BRESLIN, V.T.; SENTURK, U.; BERNDT, C.C. Long-term engineering properties of recycled plastic lumber used in pier construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v.23, n.4, p.243-258, 1998.

CANTERO, G.; ARBELAIZ, A.; MUGIKA F.; VALEA, A.; MONDRAGON, I. Mechanical behavior of wood/polypropylene composites: effects of fibre treatments and ageing process. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.22, n.1, p.37-50, 2003.

CAULFIELD, D. F.; CLEMONS, C.; JACOBSON, R.E.; ROWELL, R. M. Wood Thermoplastic Composites. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. CRC Press, Boca Raton, FL, 2005, 365-378. Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2005/fpl_2005_caulfield001.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2006.

CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Woodflour as reinforcement of polypropylene. **Materials Research**, v. 5, n. 4, p. 405-409, 2002.

CARROLL, D. R.; STONE, R. B.; SIRIGNANO, A. M.; SAINDON, R. M.; GOSE, S. C.; FRIEDMAN, M. A. Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks. **Resources, Conservation and Recycling**, v.31, n.3, p.241-251, 2001.

CEMPRE. **Pesquisa ciclosoft**. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br/ciclosoft2008.php>>. Acesso em: 16 de maio de 2008.

CHIPANSKI, E.R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil**. 2006. 193 p. Dissertação (Mestrado em ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrária, Universidade Federal do Paraná, PR, 2006. Orientador: Dimas Agostinho da Silva.

CLEMONS, C. Wood-plastic composites in the United States. **Forest Products Journal**, v.52, n.6, p.10-18, 2002.

COLOM, X.; CARRASCO, F.; PAGÈS, P.; CAÑAVATE, J. Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, p. 161-196, 2003.

COMPAM. **Reciclagem**. Disponível em: <<http://www.compam.com.br>>. Acesso em: 20 jan. 2008.

CORREA, C. A.; FONSECA, C. N. P.; NEVES, S.; RAZZINO, C. A.; HAGE JR, E. Wood-plastic composites. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.13, n. 3, p.154-165, 2003.

COUTINHO, F. M. B.; E COSTA, T. H. S. Performance of polypropylene-wood fiber composites. **Polymer Testing**, v. 18, n. 8, p. 581-587, 1999.

CROMPTON. Products and Capabilities for wood plastic composites. Disponível em:

<http://www.cromptoncorp.com/ck_prd/dsht_ax_ex_x_woodplasticcomposites.pdf>.

Acesso em: 27 de abril de 2008.

CUI, Y.; LEE, S.; NORUZIAAN, B.; CHEUNG, M.; TAO, J. Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 39, p.655–661, 2008.

DAGHER, H. J.; BRAGDON, M. Composites enhance timber bridges. **Civil Engineering**, v.71, n.8, p.2-10, 2001.

EHRIG, R.J. (ed.); **Plastic Recycling: Products and Processing**; Oxford University Press; New York; 1992.

ENGLISH, B., CLEMONS, C.M., STARK, N., AND SCHNIEDER, J.P. Waste-wood derived fillers for plastics. Gen. Tech. Rept. FPL-GTR-91. USDA FS, Forest Products Laboratory, Madison, WI, p.282–291, 1996.

FALK, B. Wood recycling. Opportunities for the wood waste resource. **Forest Products Journal**, v.47, n.6, p.17-22, 1997.

FARUK, O.; MATUANA, L.M. Nanoclay reinforced HDPE as a matrix for wood-plastic composites. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 9, p. 2073-2077, 2008.

FELIX, J.; GATENHOLM, P. The nature of adhesion in composites of modified cellulose fibers and polypropylene. **Journal of Applied Polymer Science**, v.42, n.3, p.609-620, 1991.

FONSECA, F. M. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos à base de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) reciclado e fibras vegetais**. 2005. 133p. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)** - Universidade Federal de ouro Preto, BH, 2005. Orientador: Lincoln Cambraia Teixeira; co-orientador: Sebastiana L. Bragança Lana.

FORLIN, F.J.; FARIA, J.A.F. Considerações sobre a reciclagem de embalagens plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.12, n.1, p.1-10. 2002.

GAO, M., SUN, C., ZHU, K. Thermal degradation of wood treated with guanidine compounds in air - Flammability study. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 75, p. 221-232, 2004.

GASSAN, J. About the surface characteristic of natural fibres. *Macromolecules Materials and Engineering*, v. 283, p.132-139, 2000.

GEORGE, J.; SREEKALA, M.S.; THOMAS, S. A Review on Interface Modification and Characterization of Natural Fiber Reinforced Plastic Composites. **Polymer Engineering and Science**, v.41, n. 8, p. 1471-1485, 2001

GUADAGNINI, M. A. **Madeiras plásticas como materiais alternativos para madeiras naturais**. 2001. 117 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2001. Orientador: Eloisa Biasotto Mano.

HILLIG, E. **Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, PR, 2006. Orientador: Setsuo Iwakiri, Co-orientadora: Mara Zeni Andrade.

HONG, C. K.; HWANG, I.; KIM, N.; PARK, D.H.; HWANG, B.S.; NAH, C. Mechanical properties of silanized jute–polypropylene composites. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.14, p.71-76, 2008.

HRISTOV, V. N.; LOCH, R.; GRELLMANN, W. Impact fracture behavior of modified polypropylene/wood fiber composites. **Polymer Testing**, v.23, p.581, 2004.

ICHAZO, M. N.; ALBANO, C.; GONZÁLEZ, J.; PERERA, R.; CANDAL, M. V. Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties. **Composite structures**, v. 54, n. 2-3, p. 207-214, 2001.

IETEC. **Gestão de resíduos sólidos requer maior atenção das indústrias.** Disponível em: <http://www.ietec.com.br/ietec/techoje/techoje/noticiasietec/2004/03/19/2004_03_19_0001.2xt/-template_interna>. Acesso em: 10 mar. 2008.

IDES. **Ipiranga GF 4960 Prospector.** Disponível em: <<http://prospector.ides.com/default.aspx?E=84637>>. Acesso em: 5 jan. 2008.

JANKOWSKY, I.P.; CHIMELO, J.P.; CAVANCANTE, A. de A.; GALINA, I.C.M.; NAGAMURA, J.C.S. *Madeiras brasileiras*. Caxias do Sul: Spectrum, 1990. 172p

JAYARAMAN, K.; CHAUHAN, S. S.; MODAK, J. M.; CHANDA, M. Mechanical performance of woodfibre–waste plastic composite materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 4, p. 307-319, 2004.

JOSEPH, K.; MATOSO, L. H. C.; TOLEDO, R. D.; THOMAS, S.; CARVALHO, L. H.; POTHEN, L.; KALA, S.; JAMES, B. Natural fiber reinforced thermoplastic composites. **Natural Polymers and Agrofibers Composites**. Eds. Frollini, E.; Leão, A. L.; Mattoso, L.H.C, São Carlos: Embrapa, p.159-201, 2000.

JOSEPH, P. V.; RABELLO, M. S.; MATTOSO, L. H. C.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v.62, p.1357-72, 2002.

KARMARKAR, A.; CHAUHAN, S.S.; MODAK, J.A.; CHANDA, M. Mechanical properties of wood–fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.37, n.11, p.1847-2176, 2007.

KAZAYAWOKO, M., BALATINECZ, J. J. E MATUANA, L. M. Surface modification and adhesion mechanisms in woodfiber-polypropylene composites. **Journal of materials science**, v. 34, n. 24, p. 6189-6199, 1999.

KEENER, T.J.; STUART, R.K.; BROWN, T.K. MALEATED COUPLING AGENTS FOR NATURAL FIBRE COMPOSITES. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, p. 357-362, 2003

KIM, H. S., YANG, H. S., KIM, H. J., PARK, H. J. Thermogravimetric analysis of rice husk flour filled thermoplastic polymer composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 76, p. 395-404, 2004.

KIM, J. H.; RYU, Y. K.; PARK, J. Y. Properties of wood/plastic composites prepared via melt-blending process. **Polymer-Korea**, v. 22, n. 6, p. 979-986, 1998.

KOENIG, K. M.; SYPKENS, C. W. Wood-plastic composites for market share. **Wood and Wood Products**, v.107, n.5, p.49-58, 2002.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of wood science and Technology**, vol. 1. Spring-Verlag, New York, 1984.

KRISHNASWAMY, P; LAMPO, R. **From Waste Plastics to Markets for Plastic-Lumber Bridges**. Dez. 2001. Disponível em: <http://www.astm.org/SNEWS/DECEMBER_2001/wsd_dec01.html>. Acesso em: 10 ago. 2007.

LAMPO, R.; NOSKER, D. T. **Development and Testing of Plastic Lumber Materials for Construction Applications**, USACERL Technical Report, Jun. 1997. Disponível em: <http://www.cecer.army.mil/techreports/lamlum/LAMLUM_post.PDF>. Acesso: 22 ago. 2006.

LAMPO, R.; KRISHNASWAMY, P. AND ROBBINS, A. **Development of Industry Consensus Standards for Recycled-Plastic Lumber**. Junho, 2000. Disponível em: <<http://waste.environmental-expert.com/resultEachArticle.aspx?cid=25298&codi=2221&lvel=975&idproducttype=6>>. Acesso em: 20 nov. 2007.

LARS, H., GUNNAR, J., GÖRAN, P. JIEBING, L., PIERRE, L. & GUNNAR, H. (2000) Do the extracellular enzymes cellobiose dehydrogenase and manganese peroxidase form a pathway in lignin biodegradation? **Federation of European Biochemical Societies**, v. 477, n.1, p. 79-83.

LAVERTY, R. Advanced engineered wood composites. **Forest Products Journal**, v.52, n.11/12, p.18-26, 2002.

LEE, S.Y.; YANG, H.S.; KIM, H.J.; JEONG, C.S.; LIM, B.S.; LEE, J.N. Creepbehavior and manufacturing parameters of wood flour filled polypropylene composites. **Composite Structures**, v.65, n.3, p.459–469, 2004.

LEI, Y.; WU, Q.; YAO, F.; XU, Y. Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, p.1664–1674, 2007.

LI, Q.; MATUANA, L. M. Effectiveness of maleated and acrylic acidfunctionalized polyolefin coupling agents for HDPE-wood-flour composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v.16, p. 551–564, 2003.

LI, Y.; HU, C.; YU, Y. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. **Composites Part A: Applied science and manufacturing**, v.39, p.570–578, 2008.

LIMA, E.G. **Diagnóstico ambiental de empresas de móveis em madeira situadas no pólo moveleiro de arapongas** – PR. CURITIBA, 2005. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)- Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2005. Orientador: Dimas Agostinho da Silva.

LIU, Q., LV, C., YANG, Y., HE, F., LING, L. Study on the pyrolysis of wood-derived rayon fiber by thermogravimetry - mass spectrometry. **Journal of Molecular Structure**, n. 733, p. 193-202, 2005.

LU, J. Z.; NEGULESCU I.I.; WU, Q. Maleated wood-fiber/high densitypolyethylene composites: coupling mechanisms and interfacial characterization. **Composite Interfaces**, v.12, n.1-2, p. 125-140, 2005.

MANO, E. B.; PACHECO, E. B. A. V.; BONELLI, C. M. C. Meio Ambiente, Poluição e Reciclagem. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 182 p.

MANO, E.B.; Polímeros como Materias de Engenharia. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 218p.

MARKARIAN, J. Wood-plastic composites: current trends in materials and processing. **Plastics, Additives and Compounding**, v.7, n.5, p.20-26, 2005.

MAITI, S.N.; SINGH, K. Influence of wood flour on the mechanical properties of polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science**, n. 32, p. 4285-4289, 1986.

MAPLESTON, P. Processing technology: A wealth of options exist. Modern Plastics, jun., p. 56–60. Apud CAULFIELD, DANIEL F.; CLEMONS, C.; JACOBSON, R.E.; ROWELL, ROGER M. Wood Thermoplastic Composites. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. CRC Press, Boca Raton, FL, 2005, 365-378. Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2005/fpl_2005_caulfield001.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2006.

MARKARIAN, J. Material and processing developments drive wood-plastic composites forward. **Plastics, Additives and Compounding**, v. 5, n. 4, p. 24-26, 2003.

MATTOSO, L. H. C. Conferência internacional de compósitos reforçados com fibras vegetais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.9 , n.2, p.16, 1999.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Chemical analysis of Pinus oocarpa wood part I e II: quantification of macromolecular components and volatile extractives. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p.461-478, 2005.

NACHTIGALL, S.M.B.; CERVEIRA, G.S.; ROSA, S.M.L. New polymeric-coupling agent for polypropylene/wood-flour composites. **Polymer Testing**, v.26, p. 619–628, 2007.

OLANDOSKI, D. P. **Rendimento, resíduos e considerações sobre melhorias no processo em indústria de chapas compensadas**. 2001. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. PR, 2001. Orientadora: Ghislaine Miranda Bonduelle.

ORDEN, M. U. DE LA; SÁNCHEZ, C. G.; QUESADA, M. G.; URREAGA, J. M. Novel polypropylene–cellulose composites using polyethylenimine as coupling agent. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, p. 2005–2012, 2007.

PACHECO, E. B. A. V.; CIPRIANO, C. Panorama sobre a Reciclagem de Plástico no Brasil. **Jornal de Plásticos**, mar. 2001. Disponível em: <http://www.jorplast.com.br/jp_mar01/pag07.html>. Acesso em: 15 set. 2007.

PANTHAPULAKKAL, S.; SAIN, M. Agro-residue reinforced high-density polyethylene composites: Fiber characterization and analysis of composite properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, p.1445–1454, 2007.

PASQUINI, E. M. T.; CURVELO, A. A. S.; BELGACEM, M. N.; DUFRESNE, A. Surface esterification of cellulose fibres: Processing and characterization of low-density polyethylene/cellulose fibres composites. **Composites Science and Technology**, v.68, p.193–201, 2008.

PLASTIC LUMBER. Disponível em: <<http://ced.usc.edu/dion/Eco-Park%20Feasibility%20Study/Pages/plasticlumbe>>. Acesso em: 24 ago. 2006.

PLASTIVIDA. **Desempenho e perspectivas da reciclagem dos plásticos no Brasil**. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/reciclagem/pes_mercado.htm>. Acesso em: 16 mai. 2008.

PLASTIVIDA. **Prós e contras de reciclar plásticos**. Disponível em: <<http://www.plastico.com.br/revista/pm323/plastivida.htm>>. Acesso em: 22 ago. 2007.

QIU, W.; ENDO, T.; HIROTSU, T. A novel technique for preparing of maleic anhydride grafted polyolefins. **European Polymer Journal**, v. 41, n. 9, p. 1979-1984, 2005.

QIU, W.; ZHANG, F.; ENDO, T.; HIROTSU, T. Preparation and characteristics of composites of high-crystalline cellulose with polypropylene: effects of maleated polypropylene and cellulose content. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 87, n. 2, p. 337-345, 2003.

RABELLO, M. **Aditivação de polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2000. 242p.

RAZZINO, C.A. Influência de modificações interfaciais nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com farinha de madeira. 2004. 122p. Dissertação (Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2004. Orientador: Elias Hage Júnior; co-orientador: Carlos Alberto F. Correa.

Recycled Plastic Lumber: A strategic Assessment of its Production, Use and Future Prospects. A study sponsored by: the Environment and Plastics Industry Council (EPIC) and Corporations Supporting Recycling (CSR). Jan. 2003. Disponível em: <http://www.cpia.ca/files/files/files_PlasticLumber-Final-Report.pdf>. Acesso em: 11 set. 2007

REMADE. **Gestão de resíduos sólidos na indústria madeireira.** REVISTA DA MADEIRA, n. 77 - ano 13 - novembro de 2003. Disponível em: <http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=77&id=467>. Acesso em: 23 mar. 2008.

REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. B. Retratabilidade Volumétrica e densidade Aparente da Madeira em Função da Umidade. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, n.39, p.33-40, 1998.

ROBIN, J. J., BRETON, Y. Reinforcement of recycled polyethylene with wood fibers heat treated. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v 20, n 14, p. 1253-1262, 2001.

RODOLFO JR., A.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de PVC reforçado com resíduos de Pinus para substituir madeira convencional em diversas aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, 2006.

ROLIM, A. M. **A Reciclagem de Resíduos Plásticos Pós-consumo em Oito Empresas do Rio Grande do Sul.** 2000. 142p. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2000. Orientador: Prof. Dr. Luís Felipe Nascimento.

SALIBA, E. O. S.; RODRIGUEZ, N. M.; MORAIS, S. L. A.; PILÓ-VELOSO, D. Ligninas - Métodos de Obtenção e Caracterização Química. *Ciência Rural*, v. 31, n. 5, p. 917-928, 2001.

SANTOS, A. S. F.; JOSÉ AGNELLI, A. M.; MANRICH, S. Tendências e Desafios da Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n.5, p. 307-312, 2004.

SANTOS, M. S. **Propriedades Térmicas e mecânicas de materiais reciclados à base de PET pós-consumo e cargas de coco**. 2002. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2002. Orientador: Marcos Lopes Dias e Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco.

SCHEINEIDER, J.P.; KARMAKER, A.C. Composites from jute- and kenaf-reinforced polypropylene. In: SPE ANTEC'95, p.2086-2090, mai. 1995.

SCHUT, J. H. For compounding, sheet & profile, wood is good. **Plastics Technology**, v.45, n.3, p.46-52, 1999.

SELKE, S. E.; WICHMAN, I. Wood fiber/polyolefin composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 3, p. 321-326, 2004.

SIMPESC. **Mundo dos Plásticos**. Disponível em: <http://www.simpesc.org.br/pt/plasticos_sc/mundo_plasticos.php>. Acesso em: 15 de março de 2008.

SOLIS, M. E.; LISPERGUER, J. H. Impact and Tensile Strength of Wood-Plastic Composites. **Informação Tecnológica**, v.16, n.6, p.21-25, 2005.

SOMBATSOMPOP, N.; YOTINWATTANAKUMTORN, C.; THONGPIN, C. Influence of type and concentration of maleic anhydride grafted polypropylene and impact modifiers on mechanical properties of PP/wood sawdust composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.97, n.2, p.475–584, 2005.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p.65-72, 2005.

STARK, N. M. BERGER, M.J. Effect of particle size on properties of wood-flour reinforced composites. The Fourth Conference on Woodfiber-Plastic Composites, maio, 1997. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1997/stark97d.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2006.

STARK N. M.; MATUANA, L. M. Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. **Polymer Degradation and Stability**, v.92, p. 1883-1890, 2007.

STARK, N.M.; WHITE, R.H.; CLEMONS, C.M. Heat release rate of wood-plastic composites. **Sampe Journal**, v.33, n.5, p.26-31, 1997.

STASIEK, J. Extruders for Recycling of Waste Thermoplastic Materials. **International Polymer Science and Technology**, v.24, n.5, p.96-103, 1997

STARK, N.M.; ROWLANDS, R.E. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. **Wood and Fiber Science**, v. 35, n. 2, p.167-174, 2003.

TECNOLOGIA PRODUZ MADEIRA PLÁSTICA. **Revista Plástico Moderno**, p.18, nov. 2000. Disponível em: <<http://www.plastico.com.br/revista/pm315/extrusoras4.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2008.

THE ADVANCED ENGINEERED WOOD COMPOSITES CENTER. Disponível em: <<http://www.aewc.umaine.edu/equipment/woodtruder>>. Acesso em: 6 out. 2006.

THOMAS, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v.62, p.1357-1372, 2002.

TRIMAX. Structural Large Profiles Technical Data. Disponível em: <http://www.trimaxbp.com/_files/TrimaxStructuralLargeProfilesTechnicalData.pdf>. Acesso em: 20 jul 2008.

VIANNA, W. L., CORREA, C. A., RAZZINO, C. A. Efeitos do tipo de poliestireno de alto impacto nas propriedades de compósitos termoplásticos com farinha de resíduo de madeira. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, n. 5, v. 14, p. 339-348, 2004.

XU, X.; JAYARAMAN, K.; MORIN, C.; PECQUEUX, N. Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. **Journal of materials processing technology**, v.198, p.168–177, 2008.

YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, PR, 2004b. Orientador: Arnaud F. Bonduelle Co-orientadora: Thais H.D. Sydenstricker.

YAMAJI, F. M.; BONDUELLE, A. Utilização da Serragem na Produção de Compósitos Plástico-Madeira. **Revista Floresta**, v.34, n.1, p.59-66, 2004a.

YANG, H.-S.; WOLCOTT, M. P.; KIM, H.-S.; KIM, S.; KIM, H.-J. Effect of different compatibilizing agents on the mechanical properties of lignocellulosic material filled polyethylene bio-composites. **Composite Structures**, v. 79, p. 369–375, 2007.

YANG, H.-S.; WOLCOTT, M. P.; KIM, H.-S.; KIM, H.-J. Thermal properties of lignocellulosic filler-thermoplastic polymer bio-composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 82, n. 1, p. 157-160, 2005.

YAO, F.; WU, Q.; LEI, Y.; XU, Y. Rice straw fiber-reinforced high-density polyethylene composite: Effect of fiber type and loading. **Industrial crops and products**, v. 28, n. 1, p. 63-72, 2008.

YOUNGQUIST, J. A. The marriage of wood and non-wood materials. **Forest Products Journal**, v.45, n.10, p.25-30, 1995.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced composites? **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1259-1263, 2003.

WIELAGE, B. LAMPKE, T. UTSCHICK, H. SOERGEL, F. Processing of natural-fibre reinforced polymers and the resulting dynamic-mechanical properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v.139, n.1. p. 140-146, 2003.

WOLCOTT, M.P. Production methods and platforms for wood plastics. Non-Wood Substitutes for Solid Wood Products Conference. Melbourne, Austrália: Oct., 2003.

ZARILLO G, LOCKERT C, Feasibility of Using Commingled Recycled Plastic in Marine Construction. **Final Report submitted to the Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management**, 1995. Disponível em: <http://www.hinkleycenter.com/publications/recycled_plastics_S92-3.pdf>. Acesso em: 15 jul 2008.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)