

**FÁBIO MINORU YAMAJI**

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA A PARTIR DE RESÍDUOS  
DA INDÚSTRIA MADEIREIRA**

**Tese apresentada como requisito  
parcial à obtenção do grau de Doutor  
em Ciências Florestais, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Florestal, Setor de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal do Paraná.**

**Orientador: Prof Dr Arnaud F. Bonduelle**

**Co-orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Thais H.D.  
Sydenstricker**

**CURITIBA  
2004**

À minha mãe, que não pôde ver a conclusão desse trabalho, a toda minha família e à minha mulher Akiko.

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

- Gostaria de agradecer ao meu orientador, o Prof. Dr. Arnaud Bonduelle, pela orientação dessa tese e pelo grande companheirismo demonstrado;
- Quero agradecer também à minha co-orientadora, Prof. Dra. Thais H. D. Sydenstricker, pelas valiosas contribuições que balizaram o desenvolvimento dos trabalhos;
- À UFPR em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal;
- Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida;
- Ao amigo Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima que sempre foi meu conselheiro e um grande incentivador;
- Ao Reinaldo, Elinor e Davi pela convivência nesses anos de UFPR;
- Ao professor Dr. Roberto Tsuyoshi Hosokawa pelo incentivo;
- Ao Prof. Dr. Henrique Koehler pela valiosa contribuição nas análises estatísticas;
- Ao Prof. Dr. Umberto Klock e ao Eng. Industrial Madeireiro Alan Sulato pelo apoio nos trabalhos de laboratório;
- Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR pelas análises da MEV;
- Ao professor Dr. Caraschi pelo empenho e pelo apoio nas pesquisas e nos trabalhos realizados;
- À Escola Tupy em especial aos Diretores Prof. Leonel Haguiwara e Prof. Gilberto P. Zluhan e ao técnico Márcio;
- À Escola Senai “Mário Amato”, através do Prof. Fausto e Prof. Eliseu, que gentilmente permitiu a execução de ensaios em suas instalações;
- Ao Prof. Dr. Alessandro Camargo Ângelo pela amizade e pelo incentivo;
- À Indústria de Compensados Triângulo pelo fornecimento de todo o material que permitiu o desenvolvimento desse trabalho;
- Ao Prof. Dr. Sandro Amico pelas contribuições nos ensaios realizados;
- À Milena, Dayane e Val pelo companheirismo demonstrado durante os trabalhos de laboratório;

- Aos Coordenadores da Unesp-Itapeva, Prof. Dr. Paulo Fenner e Prof. Dr. Elias Severo, pela confiança depositada e pelo grande incentivo para a conclusão desse trabalho;
- Aos alunos da Eng. Industrial Madeireira César, Fernando, Márcio e Marília pela colaboração nos ensaios desenvolvidos na Unesp-Itapeva;
- Aos amigos Dalton Razera e Emerson Schoeninger.

E, especialmente, à Akiko...por tudo!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	18
<b>3.1 RECICLAGEM</b> .....	18
3.1.1 Plásticos.....	18
3.1.2 Madeira.....	19
<b>3.2 COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA</b> .....	21
3.2.1 Histórico.....	24
3.2.2 Plástico.....	26
3.2.3 Madeira.....	27
3.2.4 Agentes Compatibilizantes.....	32
3.2.5 Aditivos.....	39
3.2.6 Outros Métodos.....	41
<b>3.3 PROCESSOS DE MOLDAGEM</b> .....	44
3.3.1 Extrusão.....	44
3.3.2 Prensagem.....	50
<b>3.4 APLICAÇÕES</b> .....	51
<b>3.5 PERFORMANCE</b> .....	55
<b>3.6 TENDÊNCIAS</b> .....	59
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	63
<b>4.1 MATERIAIS</b> .....	63
4.1.1 Madeira.....	63
4.1.2 Plástico.....	64
4.1.3 Compatibilizante.....	64
<b>4.2 EQUIPAMENTO</b> .....	65
4.2.1 Testes Preliminares.....	65
4.2.2 Preparação da Madeira.....	66
4.2.3 Compósitos.....	73
4.2.4 Moldagem de Compósitos.....	80
<b>4.3 METODOLOGIA</b> .....	83
4.3.1 Produção Piloto.....	84
4.3.2 Produção dos Compósitos Plástico-Madeira.....	86
4.3.3 Voláteis na Madeira.....	90
4.3.4 Reciclagem.....	91
4.3.5 Aplicação dos Compósitos Plástico-Madeira.....	92
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	94
<b>5.1 PRODUÇÃO PILOTO</b> .....	94
<b>5.2 MADEIRA</b> .....	97

5.2.1	Granulometria.....	97
5.2.2	Densidade .....	98
5.2.3	Teor de Umidade.....	99
5.2.4	Análise Química da Madeira .....	100
5.3	<b>COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA</b> .....	102
5.3.1	Extrusão Reativa .....	102
5.3.2	Resultados das Análises .....	104
5.3.3	Ensaio de Tração .....	105
5.3.4	Alongamento .....	119
5.3.5	Módulo de Elasticidade .....	120
5.3.6	Análise Termogravimétrica.....	121
5.3.7	Compatibilizante.....	124
5.3.8	Iniciador.....	126
5.3.9	Ensaio de Impacto .....	127
5.3.10	Outras Propriedades .....	129
5.3.11	Teor de Umidade.....	130
5.3.12	Absorção de Água.....	131
5.3.13	Inchamento em Espessura.....	133
5.3.14	Reciclagem.....	134
5.4	<b>ANÁLISE DA EXTRUSORA</b> .....	141
5.4.1	Rosca .....	142
5.4.2	Funil de Alimentação.....	143
5.4.3	Sistema de Degasagem .....	145
5.4.4	Aplicação do Compósito.....	148
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	154
7	<b>SUGESTÕES</b> .....	156
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	157
	<b>ANEXOS</b> .....	167

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO PILOTO .....	85
TABELA 2 – FORMULAÇÕES PROGRAMADAS PARA A PRODUÇÃO PILOTO	86
TABELA 3 – MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA .....	88
TABELA 4 – FORMULAÇÕES PROGRAMADAS PARA A PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA .....	89
TABELA 5 – PROGRAMAÇÃO PARA PROCESSOS DE RECICLAGEM, COM UM TOTAL DE DOZE FORMULAÇÕES DE COMPÓSITOS PLÁSTICO- MADEIRA .....	91
TABELA 6 – CONTEÚDO DE UMIDADE CALCULADO DAS MISTURAS.....	96
TABELA 7 - RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	97
TABELA 8 - RESULTADOS DOS TESTES DE DENSIDADE APARENTE.....	98
TABELA 9 - RESULTADOS DO TESTE DE TEOR DE UMIDADE .....	99
TABELA 10 - RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA .....	100
TABELA 11 - RESULTADOS DOS TESTES DE VOLATILIZAÇÃO DOS EXTRATIVOS A 170°C.....	101
TABELA 12 - RESULTADOS DA VOLATILIZAÇÃO DA ÁGUA A 170° C .....	101
TABELA 13 – MÉDIAS DOS VALORES OBTIDOS EM CADA ENSAIO .....	104
TABELA 14 – RESUMO DA ANOVA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO .....	106
TABELA 15 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MPa (GRANULOMETRIA X %MADEIRA)	107
TABELA 16 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MPa (GRANULOMETRIA X %COMPATIBILIZANTE).....	110
TABELA 17 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MPa (%MADEIRA X %COMPATIBILIZANTE) .....	114
TABELA 18 – RESULTADO DA DECOMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS SUBMETIDOS À ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA .....	122
TABELA 19 – MÉDIAS DOS VALORES ENCONTRADOS PARA DENSIDADE, TEOR DE UMIDADE, ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA.....	129
TABELA 20 – MÉDIAS DOS VALORES OBTIDOS EM CADA ENSAIO (RECICLAGEM).....	134
TABELA 21 – RESUMO DA ANOVA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA RECICLADOS .....	136
TABELA 22 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO EM MPa (%MADEIRA X N° DE EXTRUSÕES).....	138
TABELA 23 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO EM MPa (%COMPATIBILIZANTE X N° DE EXTRUSÕES).....	139

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDO A PARTIR DO POLIPROPILENO (PP) VIRGEM E DA SERRAGEM.....	16
FIGURA 2 – PRODUTOS A BASE DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA....	22
FIGURA 3 – PROVÁVEL REAÇÃO DE ESTERIFICAÇÃO E INTERAÇÕES POR LIGAÇÕES DE HIDROGÊNIO DA CELULOSE COM O POLIPROPILENO GRAFITIZADO COM O ANIDRIDO MALEICO.....	36
FIGURA 4 – PRINCIPAIS MERCADOS PARA COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA NOS ESTADOS UNIDOS EM 2000. ....	52
FIGURA 5 – AMOSTRAS DE UM PERFIL FABRICADO A PARTIR DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA (50%MADEIRA + 50%PP) PRODUZIDOS PELA EIN.....	61
FIGURA 6 – EQUIPAMENTO DE BANHO-MARIA E CONJUNTO COM BOMBA DE VÁCUO.....	67
FIGURA 7 - MUFLA.....	68
FIGURA 8 – APARELHO DE EXTRAÇÃO TIPO SOXHLET USADO NA DETERMINAÇÃO DE EXTRATIVOS DA MADEIRA.....	69
FIGURA 9 - EXTRUSORA MONORROSCA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA .....	73
FIGURA 10 - MOINHO DE FACAS .....	74
FIGURA 11 – INJETORA HORIZONTAL UTILIZADA NA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	75
FIGURA 12 – CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO E IMPACTO .....	76
FIGURA 13 – EQUIPAMENTO PARA TESTE DE IMPACTO .....	76
FIGURA 14 – MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO EMIC.....	77
FIGURA 15- MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA.....	79
FIGURA 16 – MATRIZ PARA TUBOS COM CAIXA CALIBRADORA COM SISTEMA DE VÁCUO .....	81
FIGURA 17 – EXTRUSORA MONORROSCA COM CALIBRADOR À VÁCUO E SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM ÁGUA GELADA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE PERFIS.....	82
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS .....	83
FIGURA 19 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NA PRODUÇÃO PILOTO.....	84
FIGURA 20 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NA PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA.....	87
FIGURA 21 - PROCESSO DE RECICLAGEM .....	92
FIGURA 22 – COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS A PARTIR DO PEBD RECICLADO.....	95
FIGURA 23 – SERRAGEM E PÓ-DE-LIXA UTILIZADOS NAS FORMULAÇÕES DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS.....	97
FIGURA 24 – HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS .....	98
FIGURA 25 - LIBERAÇÃO DE GASES NA EXTRUSÃO REATIVA .....	103
FIGURA26 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS	105

FIGURA 27 – CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO (GRANULOMETRIA X %MADEIRA).....	108
FIGURA 28 – MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A DIFERENÇA NA DISPERSÃO DAS FIBRAS .....	109
FIGURA 29 - CURVAS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA COMPÓSITOS COM PÓ-DE-LIXA E SERRAGEM EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE COMPATIBILIZANTE (GRANULOMETRIA X %COMPATIBILIZANTE).....	111
FIGURA 30 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DO COMPATIBILIZANTE.	112
FIGURA 31 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA DISPERSÃO DAS FIBRAS .....	113
FIGURA 32 – CURVAS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA COMPÓSITOS COM 10% E 30% DE MADEIRA EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE COMPATIBILIZANTE (GRANULOMETRIA X %COMPATIBILIZANTE).....	115
FIGURA 33 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DO COMPATIBILIZANTE EM COMPÓSITOS COM 10% DE MADEIRA.....	116
FIGURA 34 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DO COMPATIBILIZANTE EM COMPÓSITOS COM 30% DE MADEIRA.....	117
FIGURA 35 – CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO (%) .....	119
FIGURA 36 – CURVAS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	120
FIGURA 37 – CURVAS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA OS COMPÓSITO 10S E 30S EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE COMPATIBILIZANTE ....	125
FIGURA 38 - CURVAS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA OS COMPÓSITOS 10S2% E 30S2% EM FUNÇÃO DA PRESENÇA OU NÃO DO AGENTE INICIADOR .....	127
FIGURA 39 – CURVAS DO TESTE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO .....	128
FIGURA 40 – GRÁFICO DA ABSORÇÃO MÁXIMA DE UMIDADE PARA OS COMPÓSITOS 10P E 30P .....	132
FIGURA 41 – GRÁFICO DA ABSORÇÃO DE UMIDADE (IMERSÃO 24h) PARA OS COMPÓSITOS 10S E 30S .....	132
FIGURA 42 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS E RECICLADOS.....	136
FIGURA 43 - CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA OS COMPÓSITOS COM 10% E 30% DE MADEIRA EM FUNÇÃO DA RECICLAGEM (%MADEIRA X Nº DE EXTRUSÕES) .....	139
FIGURA 44 – CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA COMPÓSITOS COM 0% E 2% DE COMPATIBILIZANTE EM FUNÇÃO DA RECICLAGEM (%COMPATIBILIZANTE X Nº EXTRUSÕES) .....	140

FIGURA 45 – ROMPIMENTO DE PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA MATRIZ DURANTE O PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA DEVIDO FALHA NO SISTEMA DE AQUECIMENTO DA MATRIZ.....	142
FIGURA 46 – ESQUEMA DA ROSCA DE UMA EXTRUSORA MONORROSCA .....	143
FIGURA 47 – FUNIL DA EXTRUSORA.....	144
FIGURA 48 – PROVÁVEIS REAÇÕES DE ANIDRIDO.....	145
FIGURA 49 – EXTRUDADO IRREGULAR DEVIDO AOS GASES GERADOS NO INTERIOR DA EXTRUSORA .....	147
FIGURA 50 – TUBOS PRODUZIDOS COM COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA .....	148
FIGURA 51 – VASOS PARA ORQUÍDEAS, INJETADO COM OS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS E RECICLADOS .....	149
FIGURA 52 – RÉGUAS ESCOLARES, INJETADOS COM OS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS.....	150
FIGURA 53 – PRODUÇÃO DE PERFIL USANDO COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA EM UMA EXTRUSORA MONORROSCA .....	151
FIGURA 54 – PERFIS EXTRUDADOS A PARTIR DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS.....	152

## LISTA DE ABREVIATURA

ASTM	- American Society for Testing and Materials
CCA	- Cobre, cromo e arsênio
CRW	- Composite-reinforced wood
DETF	- Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal
L/D	- Relação comprimento/diâmetro da rosca
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
MFI	- Índice de fluidez
PE	- Polietileno
PEBD	- Polietileno de baixa densidade
PP	- Polipropileno
PPMA	- Polipropileno maleatado
PVC	- Policloreto de vinila
TAPPI	- Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TGA	- Análise Termogravimétrica
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UV	- Ultravioleta
WPC	- Wood-Plastic Composite

## RESUMO

O objetivo deste estudo foi produzir compósitos plástico-madeira através da extrusão reativa de polipropileno na presença de anidrido maleico, peróxido de dibenzoila e resíduos de madeira. O estudo foi feito através de um planejamento de experimentos fatorial que envolveu 2 granulometrias de madeira (pó-de-lixo e serragem), 2 níveis de quantidade de madeira (10% e 30%) e 4 níveis de compatibilizante (0%, 1%, 2% e 3%). Os compósitos plástico-madeira foram produzidos em uma extrusora monorroscas de 60 mm. A avaliação dos compósitos foi feita através dos ensaios dos corpos de prova injetados. Os resultados dos ensaios mostraram que os compósitos a partir da serragem apresentaram um desempenho superior aos preparados com o pó-de-lixo. A incorporação do compatibilizante, através da extrusão reativa, resultou em compósitos com melhores propriedades mecânicas. O maior ganho na resistência à tração foi de 19,1% para o compósito 30P2% (30% de pó-de-lixo com 2% de compatibilizante) em relação ao mesmo compósito sem compatibilizante. Também foi observado que os compósitos são recicláveis e, para algumas formulações, a reciclagem dos compósitos melhorou as propriedades. O maior ganho na resistência à tração foi observado para o produto 10S3X (10% de serragem com 3 extrusões) que foi 7,7% superior à sua primeira extrusão. Os compósitos plástico-madeira produzidos foram utilizados como matéria-prima para a produção de vasos para orquídeas e régua escolares (através do processo de moldagem por injeção), e tubos e perfis (pelo processo de moldagem por extrusão).

Palavras-chave: resíduos de madeira, polipropileno, extrusão reativa.

## ABSTRACT

The aim of this study was to produce wood-plastic composites (WPC) by reactive extrusion of polypropylene in presence of maleic anhydride, dibenzoile peroxide and wood residues. A factorial experiment planning was chosen for the test. For the WPC production it was used 2 wood granulometry, 2 levels of wood content (10% and 30%) and 4 levels of compatibilizing agent (0%, 1%, 2% and 3%). A single screw 60 mm was used for WPC processing. The molded test specimens were tested for composites evaluation. According to the tests, the WPC using sawdust was better than WPC using wood flour. The reactive extrusion, with maleic anhydride and peroxide, produced WPC with better mechanical properties. The composite 30P2% (30% woodflour with 2% compatibilizing agent) showed the best performance in tensile strength (19,1% up) comparing the same composite without compatibilizing agent. Also, it was observed that the produced WPC is recyclable and, the recycling can improved the mechanical properties for some WPC formulations. The best result in tensile strength was observed for 10S3X (10% sawdust with 3 extrusions) with 7,7% up comparing the same product in a single extrusion. The WPC was used as a raw material for production of orchid vases and ruler (by injection process), and tubes and frames (by extrusion process).

Key words: wood residue, polypropylene, reactive extrusion.

## 1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos no setor madeireiro é inevitável e constitui um grave inconveniente. Dentre os resíduos, o pó-de-lixo e a serragem merecem especial atenção por serem materiais de baixa densidade, exigindo grande espaço para a estocagem, além do pó-de-lixo ser um material altamente explosivo. Apesar de poder ser utilizado como combustível para caldeiras, apresenta certas restrições, pois pode danificar a estrutura interna da caldeira reduzindo sua vida útil.

Como exemplo, pode ser citado a Indústria de Compensados Triângulo, onde todo o volume de pó-de-lixo e serragem gerado pela indústria é descartado. A estocagem desse material muito fino, seco e altamente explosivo sempre foi motivo de preocupação devido ao alto risco de incêndios tanto nos sistemas de transporte como nos próprios silos de estocagem. Assim sendo, atualmente, esses resíduos não são mais armazenados em silos. Todo esse material é doado aos pequenos produtores rurais que se comprometem a retirar os resíduos da fábrica diariamente. São retirados entre quatro e cinco cargas de caminhões, por dia, que equivalem a 50 m<sup>3</sup>. Esses resíduos são utilizados, principalmente, como cobertura de solo nas lavouras e forragem ou cama para criação de animais,

Cada vez mais os resíduos vêm despertando o interesse dos pesquisadores e empresários, principalmente para verificar as possibilidades de reutilização desses materiais. Uma das formas para diminuir o desperdício e valorizar a matéria-prima é a reutilização dos resíduos.

Uma das alternativas de uso desses resíduos na indústria madeireira é a produção de compósito plástico-madeira. Segundo STARK, WHITE e CLEMONS (1997), os compósitos plástico-madeira ou WPC (wood-plastic composites) estão se tornando o material mais importante dentro do processo da reciclagem.

Uma definição bem simples para os compósitos plástico-madeira é dada por KOENIG e SYPKENS (2002). Segundo os autores, os compósitos plástico-madeira são uma mistura de madeira com a resina plástica.

Os compósitos plástico-madeira começaram a ser desenvolvido na Europa e estão sendo produzidos nos Estados Unidos há décadas. Entretanto, o maior crescimento vem ocorrendo a partir da última década. Uma das causas que impediram o desenvolvimento dos compósitos plástico-madeira foi a distância existente entre a indústria madeireira e o setor de plásticos. Outra dificuldade verificada foi que os fabricantes de plástico que tentaram usar a madeira como carga, freqüentemente não tinham conhecimento suficiente sobre a madeira. Isso fez com que as tentativas fracassassem e a combinação plástico-madeira ficasse desacreditada (CLEMONS, 2002).

Entretanto, nos últimos tempos as fibras lignocelulósicas estão se tornando alternativas econômicas e ecológicas para uso como reforços e cargas em compósitos com plásticos. As vantagens da aplicação de materiais lignocelulósicos como reforço em compósitos poliméricos é a baixa abrasividade aos moldes e equipamentos, o baixo custo, a boa aparência do material e propriedades interessantes.

Para entender como as características da madeira (espécie, tamanho das partículas, conteúdo de extrativos e o teor de umidade entre outras) influenciam na qualidade dos compósitos, é necessário investigar o efeito da interação plástico-madeira além dos agentes compatibilizantes e dos processos de fabricação nas propriedades mecânicas dos compósitos plástico-madeira.

O uso dos compósitos plástico-madeira está crescendo rapidamente. Isso se deve às vantagens desse produto em relação à madeira, como não rachar, não empenar, exigir pouca ou nenhuma manutenção e ser facilmente moldado em formas complexas (BRANDT; FRIDLEY, 2003).

Existe uma perspectiva de aumento futuro do uso do compósito plástico-madeira (FIGURA 1), pois, dependendo da formulação, pode-se obter

produtos com propriedades superiores ao plástico e à própria madeira (KOENIG e SYPKENS, 2002).

Além do aspecto técnico e econômico, o uso dos resíduos na produção de compósito plástico-madeira tem um reflexo importante no aspecto ecológico. A incorporação da madeira significa uma substituição no uso de materiais plásticos por material renovável.

Assim sendo, este estudo busca encontrar alternativas para a utilização dos resíduos gerados por uma indústria madeireira através do aproveitamento deste material como matéria-prima para a produção de novos produtos, por exemplo, o compósito plástico-madeira.

FIGURA 1 – COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDO A PARTIR DO POLIPROPILENO (PP) VIRGEM E DA SERRAGEM



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a produção de compósitos plástico-madeira ou WPC (wood-plastic composites) utilizando-se resíduos de uma indústria madeireira.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este estudo teve como objetivos específicos:

- a) verificar a possibilidade de se produzir esses compósitos em uma extrusora monorroscas;
- b) verificar qual a quantidade máxima de madeira que pode ser colocada nas formulações para a produção dos compósitos;
- c) avaliar a influência do compatibilizante nas propriedades dos compósitos produzidos através da extrusão reativa;
- d) avaliar a influência da granulometria dos resíduos da madeira no processamento e na qualidade dos compósitos plástico-madeira;
- e) verificar a possibilidade de reciclagem dos compósitos plástico-madeira produzidos.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 RECICLAGEM

##### 3.1.1 Plásticos

A reciclagem de plásticos envolve a reutilização de um resíduo plástico para obtenção de um outro artefato plástico (BLASS, 1988).

De acordo com FORLIN e FARIA (2002) uma importante característica dos materiais plásticos utilizados na reciclagem é o seu comportamento termo-físico, classificado em termoplásticos e termofixos.

Segundo WELLS (1994), a forma mais comum de reciclagem dos plásticos é a chamada reciclagem mecânica, ou secundária, onde os plásticos se fundem com aquecimento e se solidificam com resfriamento. Este tipo de reciclagem é possível para os termoplásticos. Existem outras formas de reciclagem, ainda não muito difundidas no Brasil: a reciclagem química ou recuperação terciária e a recuperação de energia ou recuperação quaternária.

FORLIN e FARIA (2002) citam ainda a reutilização (retorno) das embalagens e os processos de degradação ambiental por fotodegradação, umidade e/ou por microrganismos.

Um dos maiores problemas na reciclagem são os contaminantes, materiais como aço, alumínio, vidro, tintas, papel e resíduos de alimentos entre outros. Os resíduos provenientes do processo industrial caracterizam-se por uma maior uniformidade de materiais. Já as embalagens pós-consumo têm um elevado nível de contaminação orgânica, além da heterogeneidade de materiais. A reciclagem pela transformação mecânica deve ser a melhor opção nas condições brasileiras (FORLIN; FARIA 2002).

### 3.1.2 Madeira

Embora a destinação final dos plásticos represente uma das grandes preocupações da sociedade atual, outras atividades como a madeireira também vem afetando o equilíbrio do meio ambiente pelo grande volume de resíduos gerados.

OLANDOSKI (2001) realizou um estudo onde foram levantadas as perdas em cada fase do processo produtivo dentro de uma indústria de compensados de madeira tropical. Os resultados mostraram que o percentual de perda em volume na esquadrejadeira foi de 8,7% e na calibradora-lixadeira o volume perdido foi de 8,6%.

Em outro estudo realizado por BRAND (2000), também numa indústria de compensados, os resultados obtidos foram de 6,5% de perda em volume na esquadrejadeira e de 9,1% nas calibradoras-lixadeiras.

Segundo TOMASELLI (1999), a reciclagem é uma importante forma de aproveitamento de matéria-prima. A prática é ambientalmente desejável e, apesar desta prática ser mais desenvolvida no segmento de papel, está chegando a produtos de madeira sólida.

Assim sendo, os resíduos das atividades florestais também devem ser transformados em produtos através de processos de reciclagem práticos e econômicos.

De acordo com FALK (1997), resíduos de madeira existem em qualquer lugar. Mas, o que dificulta a sua utilização, normalmente, são o custo de transporte e a contaminação do material.

Mesmo com todas as dificuldades, cada vez mais a reciclagem vai passar a fazer parte do produto, ou seja, a vida útil de qualquer produto, bem como a reciclagem de seus componentes, devem fazer parte de qualquer projeto.

O ideal seria que os resíduos de uma atividade fossem os insumos de outras. Entretanto, sabe-se que o processo da reciclagem não é tão simples quanto parece ser.

FALK (1997) cita que para que a reciclagem dos resíduos da madeira possa fazer parte de um processo de produção existem muitos obstáculos técnicos e econômicos, tais como o teor de umidade dos resíduos, a mistura de espécies e a contaminação entre outros.

Ainda, segundo FALK (1997), durante muitas décadas, a utilização mais comum desses resíduos da madeira tem sido como combustível para caldeiras e, mais recentemente, no fabrico de aglomerados e MDF (Medium Density Fiberboard). Contudo, muitas vezes os resíduos são simplesmente queimados a céu aberto.

Enquanto a maioria das empresas madeireiras tem a serragem como resíduo, existem algumas empresas em que a serragem é o produto final. Essas empresas produzem e comercializam a serragem. A diferença entre a “serragem resíduo” e a “serragem produto” está na garantia da qualidade. A serragem como produto atende a especificações técnicas de granulometria, teor de umidade, espécie de madeira, cor, além da garantia de fornecimento contínuo.

Um fator que tem favorecido a reciclagem foi o aumento das obrigações quanto ao manejo dos resíduos que permitiram o desenvolvimento de novos produtos reciclados (BOEGLIN; TRIBOULOT; MASSON, 1997).

Dentre esses produtos, segundo STARK, WHITE e CLEMONS (1997), os compósitos plástico-madeira estão se tornando o material mais importante dentro da reciclagem.

### 3.2 COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA

Compósitos são materiais formados por uma fase contínua polimérica (matriz) e reforçada por uma fase descontínua (fibras). As duas fases proporcionam ao material final, propriedades especiais que definem sua moderna e ampla aplicabilidade e que fazem com que engenheiros e técnicos procurem cada vez mais os compósitos como solução para seus projetos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS PLÁSTICOS COMPOSTOS, 2003),

De acordo com CANEVAROLO Jr. (2002), a distribuição de esforços ou tensões em uma matriz polimérica deve ser uniforme. Por exemplo, se a resistência à tração da segunda fase (carga) for maior que a matriz, o resultado será um aumento nas propriedades mecânicas do compósito.

Para CLEMONS (2002), o termo compósito plástico-madeira refere-se a qualquer compósito que contenha madeira (em qualquer forma) e uma resina termofixa ou termoplástica. Entretanto, a forma mais freqüente encontrada nos compósitos plástico-madeira são os termoplásticos.

Segundo BRANDT e FRIDLEY (2003) o uso dos compósitos plástico-madeira está crescendo rapidamente. Isso se deve às vantagens desse produto em relação à madeira, como não rachar, não empenar e exigir pouca ou nenhuma manutenção.

Uma das características dos produtos a base de compósito plástico-madeira é que eles podem ser trabalhados nas mesmas máquinas para trabalhar a madeira. O material pode ser serrado, parafusado, pregado, furado e aplainado como uma peça de madeira (YOUNGQUIST, 1995; WARDEL, 2002; KOENIG; SYPKENS, 2002).

Existe uma perspectiva de aumento do uso do compósito plástico-madeira, pois, dependendo da formulação, pode-se obter produtos com propriedades superiores ao plástico e à própria madeira (KOENIG; SYPKENS, 2002).

Nos Estados Unidos existem vários nomes já patenteados para os compósitos plástico-madeira, como WoodPlast, CertaWood, Extrudawood, TimberTech, Polywood, Fibrex, Trex, Timbrex, Fiberon, ChoiceDeck, SmartDek entre outros (SPECIALCHEM, 2003).

REYNOLDS (2004) cita que no Reino Unido os compósitos plástico-madeira são pouco conhecidos embora já existam nomes comerciais como Epoch, Knotwood e Timbaplus. O mesmo autor cita, ainda outros nomes comerciais para os compósitos plástico-madeira como Carefree Xteriors e Woodcomp nos Estados Unidos; Durawood na Austrália; Techwood na Alemanha e Alloywood na China.

No Japão a empresa Ein Co. Ltd. patenteou a marca E-Wood que consiste num compósito plástico-madeira cuja composição básica é de 55% de madeira e 45% de polipropileno. A empresa possui ainda 75 patentes referentes ao compósito plástico-madeira (EIN, 2001). A FIGURA 2 mostra alguns produtos a base de compósitos plástico-madeira produzidos pela empresa japonesa.

FIGURA 2 – PRODUTOS A BASE DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA



FONTE: EIN (2001)

Em Taiwan, uma empresa iniciou em 2003 a produção de perfis, pisos e molduras a partir de compósitos plástico-madeira com o nome Eubert (FETECH, 2004).

KACZMAREK e WORTBERG (2004) também citam algumas marcas de compósitos plástico-madeira como Fasalex na Áustria, Pro Poly Tech na Alemanha e Techwood na Argentina.

Os compósitos plástico-madeira irão contribuir para a reciclagem de resíduos de madeira bem como deverão se tornar base para o desenvolvimento de novos tipos de materiais a base de madeira (OKAMOTO, 2003).

No Brasil existem algumas citações utilizando o termo “madeira plástica”. Entretanto, esses produtos não contêm nenhum percentual de madeira em sua composição.

De acordo com BLASS (1988) um processo de reciclagem mecânica, é a reciclagem de resíduos plásticos misturados, para obtenção de perfis extrudados que podem substituir a madeira natural. São denominadas "madeiras plásticas".

FERRO (1999) cita que existem projetos elaborados por empresas de reciclagem de plásticos para substituir os perfis de madeira, chapas, sarrafos, tábuas e pontaletes empregados na construção civil, por similares moldados com termoplásticos reciclados.

De acordo com GUADAGNINI (2001) e MANO (2002), a UFRJ desenvolveu um projeto de materiais alternativos a partir da reciclagem de plásticos recolhidos do lixo urbano. Um dos produtos desenvolvidos é a “madeira plástica” feita a partir de sacos descartados.

BITTENCOURT (2002) cita uma tecnologia que possibilita a fabricação de postes a partir de material plástico reciclado. Comercialmente recebe o nome de bioposte. O produto leva em sua composição todo tipo de plástico reciclável.

Apesar da denominação “madeira plástica”, esse produto é composto apenas com material plástico. Portanto, não deve ser confundido com os compósitos plástico-madeira.

Os compósitos plástico-madeira são mais parecidos com a madeira do que as chamadas “madeiras plásticas”. As fibras da madeira proporcionam uma superfície não escorregadia, e ainda os compósitos podem ser pintados com tinta óleo ou a base de água. As fibras da madeira são também um estabilizador natural contra os raios UV (PLASTICS TECHNOLOGY, 1993).

### 3.2.1 Histórico

Segundo SCHUT (1999) os compósitos plástico-madeira foram durante algum tempo produzidos por poucos especialistas. Somente nos últimos anos é que o mercado tem surgido com novos produtos e novas aplicações para os compósitos.

Na verdade, por volta de 1900 foi criado na Europa o primeiro tipo de compósito envolvendo a madeira e um tipo de plástico termofixo. O produto foi denominado de Bakelite. O Bakelite era produzido a base de pó de madeira com resina fenólica e foi muito utilizado na fabricação de partes do automóvel Rolls Royce (CLEMONS, 2002).

As primeiras pesquisas com compósitos plástico-madeira foram na década de 50 quando as indústrias automotivas começaram adicionar pó de madeira ao polipropileno na fabricação de algumas partes internas dos carros. No final da década de 80 o compósito plástico-madeira começou a ser usado na fabricação de decks (KOENIG; SYPKENS, 2002).

Uma das causas que impediram o desenvolvimento dos compósitos plástico-madeira foi a distância existente entre a indústria madeireira e o setor de plásticos. Essas indústrias competem em mercados diferentes, os produtos florestais e as indústrias de plásticos possuem poucos materiais e

equipamentos em comum e eles processam os materiais de forma muito diferentes (YOUNGQUIST, 1995).

Outra dificuldade verificada foi que os fabricantes de plástico que tentaram usar a madeira como carga, freqüentemente, não tinham conhecimento suficiente sobre a madeira. Isso fez com que as tentativas fracassassem e a combinação plástico-madeira ficasse desacreditada (CLEMONS, 2002).

YOUNGQUIST (1995) cita que um dos problemas encontrados nos compósitos plástico-madeira era a inadequada estabilização dos componentes plásticos aos raios UV.

Apesar do compósito plástico-madeira começar a ser desenvolvido na Europa, teve um grande avanço de produção nos Estados Unidos. Entretanto, o maior crescimento no mercado vem ocorrendo a partir da última década (CLEMONS, 2002).

Em 1971 na Itália foi patenteado um processo de extrusão de WPC para uma mistura de 50% de pó de madeira e 50% de polipropileno (PP). O material era inicialmente misturado com uma extrusora dupla rosca e depois extrusado em forma de lâminas (filmes) para a produção de partes interiores de automóveis. Em 1983, o mesmo processo foi licenciado nos Estados Unidos (SCHUT, 1999). Segundo CLEMONS (2002), esta foi a primeira grande aplicação da tecnologia WPC nos Estados Unidos.

No início dos anos 90 a Itália desenvolveu um sistema onde 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. A adição do pó de madeira nas chamadas “madeiras plásticas” (100% plástico reciclado) e nos perfis de janelas também ocorreu no início dos anos 90 (SCHUT, 1999).

Ainda no início dos anos 90 os Estados Unidos apresentam um novo processo onde a alimentação da madeira e dos polímeros era feita em separado não exigindo a pré-mistura (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.

A Universidade de Maine, em 1995, desenvolveu a primeira madeira para uso marinho, obtida a partir de polímeros reforçados com fibras de madeira (DAGHER; BRAGDON, 2001).

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).

Em 1996 a Universidade de Maine foi reconhecida pela National Science Foundation como o centro mundial para a pesquisa e o desenvolvimento de compósitos de madeira (LAVERTY, 2002).

A primeira conferência internacional em compósitos plástico-madeira ocorreu nos Estados Unidos em 1991. Atualmente, as conferências são realizadas também no Canadá e em vários países da Europa (CLEMONS, 2002).

### 3.2.2 Plástico

De acordo com SAHEB e JOG (1999), as vantagens mais importantes no uso de polímeros são o fácil processamento, a produtividade e a redução de custos. Em muitas dessas aplicações, as propriedades dos polímeros podem ser modificadas pela adição de cargas.

Dentre as propriedades de um material polimérico, duas podem ser destacadas devido a importância das mesmas, a facilidade de fabricação e a resistência ao impacto (PAIVA; TRINDADE; FROLLINI, 1999).

Nos compósitos plástico-madeira, o plástico é o meio para melhorar as características como a resistência à umidade, ao ataque de insetos e fungos (SCHUT, 1999).

Entretanto, de acordo com ENGLISH (2002a), numa temperatura onde muitos plásticos são processados a madeira irá entrar em combustão. Por isso, as formulações dos compósitos plástico-madeira ficam restritas a determinados tipos de plásticos, onde a temperatura de processamento é relativamente baixa (polietileno e polipropileno).

Segundo KOENIG e SYPKENS (2002), dentre os materiais plásticos, o polipropileno, polietileno, poliestireno e o policloreto de vinila (PVC) são os mais utilizados nas formulações de compósitos plástico-madeira para a fabricação de pisos, decks e moldados entre outros.

### 3.2.3 Madeira

Os reforços tipicamente usados nos plásticos, como a fibra de vidro, são materiais caros e pesados. As fibras de madeira, que são mais baratas, não abrasivas e mais leves, também podem ser utilizadas como reforço para os plásticos. Tratando-se de compósitos plástico-madeira, tanto o plástico quanto a madeira podem ser obtidos a partir de reciclados (ENGLISH, 2002a).

Atualmente as fibras vegetais estão se tornando alternativa econômica e ecológica para uso como cargas de reforços e enchimento em compósitos com plásticos. Há quem preveja a gradual substituição de reforços sintéticos tradicionais, particularmente fibras de vidro, por esses materiais (NOTHENBERG, 1996).

Para CANTERO et al. (2003) as fibras lignocelulósicas são recursos abundantes e renováveis, além de serem recicláveis e biodegradáveis.

YOUNGQUIST (1995), JOSEPH et al. (1996), MATTOSO (1999), JOSEPH et al. (2002) e COLOM et al. (2003) citam que as vantagens na utilização de fibras vegetais para compósitos poliméricos são a melhoria do desempenho mecânico de plásticos convencionais, a diminuição do impacto ambiental, a reciclabilidade e o menor custo.

Segundo ROZMAN (1998), SAHEB e JOG (1999), outras vantagens da aplicação de materiais lignocelulósicos como reforço em compósitos poliméricos são a baixa densidade e a baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos.

GARDNER (2001) cita que a densidade dos compósitos pode variar muito dependendo do tipo de carga utilizada. Por exemplo, a densidade de compósitos com 40% de fibras em polipropileno deve ficar em torno de 1,3 g/cm<sup>3</sup> para fibra de vidro; 1,26 g/cm<sup>3</sup> para carbonato de cálcio e 1,24 g/cm<sup>3</sup> para talco. Sendo que os compósitos com a madeira apresentaram a menor densidade, 1,07 g/cm<sup>3</sup>.

De acordo com BRITISH PLASTICS & RUBBER (2001) é crescente o interesse na utilização do pó de madeira como carga para produzir produtos parecidos com a madeira. Quando a madeira tem um perfil muito complexo para uma usinagem, resultando em altos níveis de resíduos, é vantajoso o uso de compósitos plástico-madeira.

SCHUT (1999) adverte que a 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. A madeira incorpora uma resistência natural contra os raios UV e causa menor abrasão na extrusora do que as fibras de vidro. O aspecto negativo é que, trabalhar com o pó de madeira aumenta o risco de incêndio e explosão.

Nos compósitos com polipropileno, quanto maior a concentração de fibras de madeira, menor será a maleabilidade do compósito. Para produtos que requerem alta rigidez a carga de madeira deve ser da ordem de 50% a 70% da mistura. Para produtos que requerem maior flexibilidade ou maleabilidade, a concentração de madeira deve ser menor (KOENIG; SYPKENS, 2002).

Segundo STOKKE e GARDNER (2003), para se utilizar partículas ou fibras de madeira como carga de enchimento ou reforço em compósitos, é fundamental entender as características químicas e estruturais da madeira. A

madeira é constituída pela celulose, hemicelulose, lignina e numerosos extrativos.

Ainda segundo os autores, a composição química da madeira também varia entre as espécies. Existem diferenças significativas entre as estruturas anatômicas de coníferas e folhosas. Essas diferenças podem ter efeito no uso desses materiais em compósitos. Além disso, essas características estruturais e químicas, combinadas com outras características como o tamanho e forma das partículas, conteúdo de umidade entre outras, são importantes para o entendimento do comportamento que esses materiais terão quando utilizados em compósitos poliméricos.

Tipicamente, o pó de madeira de folhosas são preferidas para a produção do compósito plástico-madeira. A razão é que a maioria das coníferas possui compostos aromáticos que podem ser inflamáveis (KOENIG; SYPKENS, 2002).

De acordo com STARK (1999), STARK e ROWLANDS (2003), o pó de madeira é a forma mais comum encontrada nas misturas com termoplásticos.

O pó de madeira pode ser definido como as partículas menores que 20 mesh. Lembrando que o mesh é determinado pelo número de aberturas numa tela em uma polegada linear. Assim, quanto maior o número do mesh, menor o tamanho das partículas (KOENIG; SYPKENS, 2002).

O tamanho das partículas do pó de madeira comercializado varia entre 20 e 100 mesh. As chamadas fibras de madeira tem uma dimensão (comprimento : diâmetro) que varia entre 10 : 1 e 20 : 1, enquanto o pó de madeira apresenta uma relação que varia de 1 : 1 a 4 : 1. As partículas mais finas aumentam a rigidez, mas perdem na resistência ao impacto. As fibras longas contribuem para a resistência e diminuição do peso. Além da uniformidade e do tamanho das partículas, a espécie de madeira utilizada na obtenção do pó, também tem muita influência no processo e no produto final (SCHUT, 1999).

Para entender as relações entre o tamanho das partículas de madeira e a qualidade dos compósitos, alguns autores investigaram o efeito da granulometria do pó de madeira nas propriedades mecânicas dos compósitos plástico-madeira.

STARK (1999) comparou as propriedades mecânicas de polipropileno reforçado com fibra de madeira ou com pó de madeira. Os resultados mostraram que os compósitos a partir das fibras apresentaram um aumento nas resistências quando comparados aos compósitos com pó de madeira.

STARK e ROWLANDS (2003) compararam as propriedades de compósitos com pó de madeira, com os compósitos reforçados com fibra de madeira. Partículas de pó de madeira (35, 70, 120, e 235 mesh) foram misturadas nas proporções de 20% e 40% (peso) ao polipropileno. As fibras de madeira resultaram nas maiores resistências nas duas proporções.

De acordo com STARK e BERGER (1997) e MASSON (1998) a umidade e a granulometria devem ser rigidamente controladas, uma vez que podem produzir discontinuidades de processo e peças com características inaceitáveis devido à presença de bolhas ou manchas superficiais causadas por processos termo-oxidativos.

No Reino Unido, desde 1997 estão sendo produzidas cargas de pó de madeira para a fabricação de compósitos. Várias granulometrias são produzidas e o conteúdo de umidade é reduzido a 0,1% (BRITISH PLASTICS & RUBBER, 2000).

Segundo REYNOLDS (2004) a empresa Timbapplus no Reino Unido compra os resíduos de madeira limpos, com determinada granulometria e com teor de umidade em torno de 8%. Para o processamento dos compósitos plástico-madeira, o teor de umidade da madeira é reduzido para 2%.

Devido às características exigidas pelo mercado de compósitos plástico-madeira, que necessita de pó de madeira seca a níveis próximos a 0%, muitos desenvolvimentos tecnológicos foram necessários no setor de secagem

da madeira. Essas inovações vão desde o uso do CAD (computer-aided design) que permitem a criação de modelos com simulação; uso de softwares para controle do programa de secagem; uso de sistemas de secagem não tradicionais como microondas, a esteira com fluído, a secagem por spray e até a combinação de vários sistemas (PROCESS HEATING, 2004).

De acordo com ENGLISH (2002a), apesar de a madeira ser um material bom e barato, existem dois pontos críticos para a sua utilização: a umidade e a temperatura do processo. Em geral, uma madeira com 8% de umidade, pode ser considerada seca. Entretanto, num processamento típico de plásticos considera-se seco um material com 0,1% de umidade.

CLEMONS (2002) cita que, para a indústria de plástico, um conteúdo de umidade de 1% ou 2% já pode ser considerado alto.

Para KOENIG e SYPKENS (2002) a pré-secagem do pó de madeira para um conteúdo de umidade menor que 1% ajuda no processamento.

Outro ponto crítico é a temperatura do processo, que pode degradar a madeira. Segundo SAHEB e JOG (1999), essa degradação térmica das fibras de madeira pode resultar em algumas propriedades organolépticas, como odor e cor indesejáveis e ainda uma deterioração das propriedades mecânicas. A degradação térmica das fibras também resulta na produção de voláteis quando a temperatura do processo é maior que 200° C. Isso leva a obter um produto poroso com baixa densidade e propriedades mecânicas inferiores.

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. Acima de 175° C a liberação de gases ainda é pequena.

Essa baixa temperatura de degradação da celulose constitui um fator limitante do processo, entretanto, os efeitos negativos podem ser diminuídos quando os tempos de residência são minimizados (FROLLINI; LEÃO; MATTOSO, 2000).

SCHUT (1999) e VERHEY e LAKS (2002) advertem que o pó de madeira é muito sensível à umidade e à temperatura. Temperaturas acima de 200° C começam a degradá-la. Níveis de umidade acima de 0,5% no pó de madeira podem fazer com que o compósito fique com bolhas de ar (esponjoso) na extrusora. Normalmente, os fabricantes de compósitos plástico-madeira especificam o nível máximo de umidade aceitável para a madeira que vai entrar no processo. Entretanto, esse nível pode variar de 6% até mais de 20% de umidade, dependendo do processo e dos equipamentos utilizados na produção dos compósitos.

A absorção de umidade pela madeira é devido ao caráter hidrofílico da celulose. Num compósito plástico-madeira isso resulta num enfraquecimento na interface de adesão entre a madeira hidrofílica e a matriz polimérica hidrofóbica. Essa característica afeta também a dispersão das fibras que tendem a formar aglomerados por ligações de hidrogênio que, por sua vez, aumentam o nível de absorção de umidade. Entretanto, métodos físicos e químicos através do uso de compatibilizantes e aditivos permitem contornar algumas dessas dificuldades (CANTERO et al., 2003).

Madeira e plástico não são os únicos componentes do compósito plástico-madeira. Esses compósitos podem conter materiais que são adicionados em pequenas quantidades para melhorar o processamento ou o desempenho. Embora as formulações sejam segredos das indústrias, os aditivos utilizados são agentes compatibilizantes, pigmentos, lubrificantes, fungicidas e estabilizantes entre outros (MAPLESTON, 2001).

#### 3.2.4 Agentes Compatibilizantes

Nos compósitos plástico-madeira, a transferência de tensões da matriz (polímero) para as fibras ocorre na região de contato entre o polímero e a carga, a interface. Essa interface assume papel decisivo nas propriedades mecânicas do compósito, de modo que uma boa adesão resulta em boas

propriedades mecânicas. Por sua vez, a adesão está relacionada com as propriedades químicas das fibras e da matriz (RABELLO, 2000).

Devido à baixa compatibilidade existente entre as fibras lignocelulósicas e a matriz termoplástica, um pré-tratamento ou a incorporação de algum compatibilizante, geralmente, é requerido nas formulações de compósitos plástico-madeira (LU; WU; McNABB, 2000; COLOM et al., 2003).

SCHUT (1999) discute que, embora alguns polímeros sejam mais compatíveis que outros o plástico e a madeira não se interagem facilmente. Por isso, nos processos patenteados de WPC, geralmente, são acrescentados algum tipo de agente compatibilizante.

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

Os agentes compatibilizantes têm um papel muito importante para aumentar a compatibilidade entre as fibras de madeira e os polímeros, e assim, melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos (TAKASE; SHIRAISHI, 1989; LU; WU; NEGULESCU, 2002).

Uma forma de melhorar a compatibilidade entre o polímero e a fibra é por modificação na matriz. A forma mais comum é aplicar um grupo polar na matriz via reação de enxertia com monômeros polares como o anidrido maleico (RABELLO, 2000).

De acordo com BLEDZKI, REIHMANE e GASSAN (1998), a interface entre fibra e matriz influencia consideravelmente as propriedades de reforço dos compósitos. A qualidade dessa interface determina a habilidade de transferir as tensões da matriz para a fibra, determinando assim a resistência ao compósito.

Caso a adesão não seja perfeita, surgirão inevitavelmente vazios na região interfacial, provocando a fragilização do material. Normalmente a falha de um compósito origina-se da quebra da interface e não devido à quebra de um dos componentes (RABELLO, 2000).

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

Um dos efeitos do compatibilizante é reduzir a tensão interfacial entre a fase dispersa e a matriz, ou seja, apresentar um efeito emulsificante, facilitando a dispersão de uma fase na outra. Outro efeito é aumentar a interação e, portanto a adesão, entre os contornos das fases facilitando a transferência de tensões e, um terceiro efeito, é estabilizar a fase dispersa evitando a sua coalescência (ABDELLAH; UTRACKI, 1996).

Segundo KAZAYAWOKO, BALATINECZ, e MATUANA (1999) e COUTINHO e COSTA (1999), a escolha de agentes compatibilizantes para promover uma melhor adesão interfacial entre as fibras e a matriz polimérica seguem alguns critérios. Inicialmente o compatibilizante ou agente de acoplamento, em contato com a superfície do reforço deve interagir fortemente com as fibras através de ligações covalentes fortes ou interações secundárias do tipo ácido-base ou ligações de hidrogênio. Isto implica que uma quantidade suficiente de grupos funcionais deve estar presente no compatibilizante 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.

Existem diferentes mecanismos de adesão atuando nos compósitos plástico-madeira. Nos compósitos sem nenhum tipo de compatibilizante

predomina um tipo de adesão físico-mecânico muito fraco denominado interdifusão. Havendo a presença de compatibilizantes, múltiplos mecanismos de adsorção, interdifusão, outros tipos de ligações químicas como as ligações covalentes (COLOM et al., 2003)

Do ponto de vista mecânico, os agentes compatibilizantes atuam no sentido de evitar o processo de delaminação da fibra na matriz polimérica que ocorre por incompatibilidade química e acaba comprometendo o reforço do compósito devido à transferência ineficiente de esforços na interface fibra-matriz (JOSEPH et al., 2000).

De acordo com RABELLO (2000) os mecanismos de adesão entre os constituintes de um compósito são basicamente:

- a) ligação química: é a forma mais eficiente de adesão em compósitos. Ocorre geralmente com a utilização de agentes compatibilizantes, que servem de ponte entre o polímero e as fibras;
- b) adesão mecânica: é o resultado do preenchimento pelo polímero nos entalhes, nos cantos vivos e outras irregularidades das fibras. A resistência desta ligação tende a ser baixa em relação à ligação química e à adsorção;
- c) adsorção e molhamento: o molhamento eficiente das fibras pelo polímero remove o ar e cobre todas as suas protuberâncias. Este mecanismo, que depende das tensões superficiais dos componentes, fica impossibilitado de ocorrer quando há camadas de água na superfície das fibras hidrofílicas;
- d) interdifusão: é possível formar uma ligação entre duas superfícies poliméricas pela difusão de moléculas de uma fase para a outra. Em compósitos isto pode ocorrer quando as fibras são pré-cobertas com um polímero antes de serem incorporadas pela matriz;
- e) atração eletrostática: ocorre quando duas superfícies possuem cargas elétricas opostas, como nas interações ácido-base e ligações iônicas.

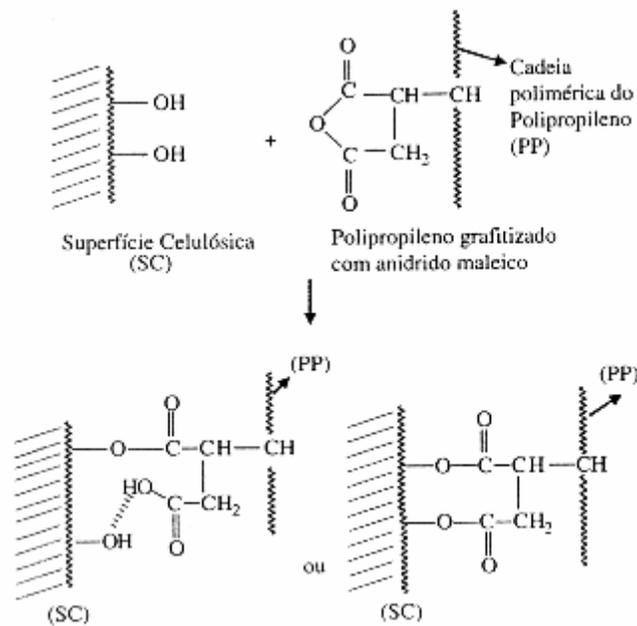
Embora não seja um mecanismo decisivo, é importante em alguns tipos de tratamentos superficiais de cargas.

Segundo RABELLO (2000) dos mecanismos de adesão expostos acima a adsorção e a ligação química são as formas mais significativas de se obter reforço.

COLOM et al. (2003) testaram várias composições de compósitos e concluíram que a resistência dos compósitos plástico-madeira depende do conteúdo de madeira e do tipo de agente compatibilizante utilizado.

A FIGURA 3 mostra de uma maneira simplificada a provável reação de esterificação e interações por ligações de hidrogênio que deve ocorrer na interface entre a celulose e a matriz com polipropileno maleatado (PPMA).

FIGURA 3 – PROVÁVEL REAÇÃO DE ESTERIFICAÇÃO E INTERAÇÕES POR LIGAÇÕES DE HIDROGÊNIO DA CELULOSE CÔM O POLIPROPILENO GRAFITIZADO COM O ANIDRIDO MALEICO



FONTE: CORREA et al. (2003)

Um produto largamente empregado e citado por vários autores como compatibilizante entre as fibras e as matrizes poliméricas é o polipropileno maleatado (TAKASE; SHIRAIISHI, 1989; FELIX; GATENHOLM, 1991; BLEDZKI; GASSAN; THEIS, 1998; CANTERO et al., 2003; CORREA et al., 2003).

De acordo com COSTA (1997) essas reações para a ligação entre PPMA e as fibras celulósicas não são isoladas. A modificação da fibra celulósica com o anidrido maleico pode ser em uma etapa. Entretanto, simultaneamente, são formados radicais livres no polipropileno permitindo a ocorrência de reações múltiplas envolvendo os radicais formados.

Para SANADI, CAULFIELD e JACOBSON (1997) o compatibilizante ideal para polipropileno reforçado com fibra celulósica poderia ser um copolímero de polipropileno-anidrido maleico (PPMA) contendo alto teor, entre 6 a 10% em massa, de anidrido maleico.

O estudo de compósito plástico-madeira desenvolvido por TAKASE e SHIRAIISHI (1989) mostrou que a adição de 2,5% de PPMA resultou num aumento da resistência à tração dos compósitos. De 2,5 a 20% o aumento na resistência foi mínimo. Para quantidades acima de 35% de PPMA houve um gradual decréscimo na resistência à tração.

KIM, RYU e PARK (1998) também utilizaram o polipropileno maleatado como agente compatibilizante. O percentual de pó de madeira utilizado foi de 50% em peso e até 15% de agente compatibilizante. A resistência à tração aumentou com a adição do agente compatibilizante, mas a resistência ao impacto não se alterou.

Em outro estudo, CANTERO et al. (2003) utilizaram a extrusão para a produção dos compósitos e a prensagem para a confecção dos corpos de prova. Nesse estudo, os resultados mostraram que um percentual entre 2,5 e 5% de PPMA proporcionaram os melhores resultados nas propriedades mecânicas.

COUTINHO, COSTA e MELO (1999) argumentaram que o custo de um polímero modificado (PPMA) comercial é alto, e sua utilização no compósito

só é economicamente viável se for usado em pequenas proporções com o PP. Os autores observaram que 2% de PPMA na matriz de PP foram suficientes para a obtenção de um compósito com melhor resistência à tração que o PP puro.

Segundo COLOM et al. (2003) o uso de agente compatibilizante nos compósitos plástico-madeira também tem um efeito de proteção contra a penetração de água.

Para LU, WU e NEGULESCU (2004) o tratamento com compatibilizante foi importante para o aumento da compatibilidade e adesão na interface. O processo em duas etapas foi melhor que o processo em uma só etapa porque os agentes compatibilizantes são melhores distribuídos na interface.

Entretanto, nem sempre o uso de compatibilizantes significa uma melhora nas propriedades. CARASCHI e LEÃO (2000a) estudaram o efeito do PPMA nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibras vegetais. Os autores concluíram que, com 1% de compatibilizante, as propriedades mecânicas não foram afetadas significativamente.

DIGABEL et al. (2004) produziram compósitos usando a palha do trigo como reforço e as matrizes foram um copolímero (etileno mais propileno) e um poliéster biodegradável. Também foram testados três tipos de compatibilizantes: PPMA, ácido esteárico e um silano. Os autores concluíram que o uso dos compatibilizantes não melhorou as propriedades mecânicas dos compósitos.

Segundo BLEDZKI, REIHMANE e GASSAN (1998) as mudanças nos mecanismos de interação polímero-madeira são complexas e específicas, dependem das condições de processamento e de todo o sistema utilizado.

KAZAYAWOKO, BALATINECZ, e MATUANA (1999) pesquisaram as interações entre os grupos anidrido do polipropileno maleatado (PPMA) e os grupos hidroxílicos das fibras de madeira para compreender os mecanismos

responsáveis pela adesão interfacial entre as fibras da madeira e a matriz de polipropileno.

De acordo com os autores, a eficácia do PPMA para melhorar as propriedades mecânicas (particularmente a resistência à tração) dos compósitos foi atribuída ao efeito da compatibilização. Esse efeito vem acompanhado de algumas propriedades como a melhor orientação e dispersão das fibras e a melhora na impregnação da matriz polimérica entre outras. Entretanto, não houve uma conclusão quanto aos efeitos das ligações de esterificação nas propriedades dos compósitos.

Segundo RABELLO (2000) e CORREA et al. (2003), 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.

### 3.2.5 Aditivos

São vários os aditivos utilizados nos compósitos plástico-madeira, como agentes compatibilizantes, dispersantes, lubrificantes, estabilizadores (luz e calor), além de pigmentos e produtos químicos como inseticidas e fungicidas.

De acordo com YOUNGQUIST (1995) e SANCHES; FERREIRA e FELISBERTI (1999), o uso dos compósitos plástico-madeira pode ser limitado por algumas características como a resistência ao impacto, o desempenho frente ao fogo e a degradação aos raios ultravioleta (UV). Contudo, esses problemas podem ser solucionados com o uso de aditivos.

Para SAHEB e JOG (1999) as propriedades mecânicas dos compósitos plástico-madeira podem ser melhoradas pela inclusão de aditivos nas formulações.

Um dos problemas no processamento de compósitos é a tendência da formação de agregados quando a madeira não é tratada, devido às forças de atração intramolecular entre as fibras. BLEDZKI, REIHMANE e GASSAN (1998) citam que a dispersão das fibras de madeira pode ser melhorada através de um pré-tratamento com lubrificantes.

Existem várias pesquisas desenvolvidas para estudar o efeito dos aditivos nos compósitos plástico-madeira.

STARK (1999) cita que a adição de ácido esteárico nos compósitos para aumentar a dispersão da madeira no polipropileno não alterou as propriedades do WPC. Entretanto, a adição do PPMA, para aumentar a adesão interfacial entre as duas fases resultou num aumento nas resistências.

HWANG et al. (1999) utilizaram um agente compatibilizante, anidrido ftálico (PA) para aumentar a força de adesão na interface entre a matriz de polietileno (PE) e as fibras. Foram avaliados o efeito do pó de madeira e a concentração de PA nas propriedades mecânicas dos compósitos. Para o compósito (30% de pó) tratado com 3% de PA a resistência à tração máxima foi de 25.91 MPa.

TAKASE e SHIRAISHI (1989) utilizaram o polipropileno modificado com metacrilato de glicidila e hidroxietilmetacrilato, além do PPMA.

RAJ e KOKTA (1989) usaram o ácido esteárico como agente dispersante em compósitos de fibras de madeira e PP. Um teor de 3% foi o suficiente para atingir o máximo de redução no número e tamanho de agregados de fibras.

VIKSNE et al. (2004) estudaram a influência da parafina na dispersão das fibras e nas propriedades dos compósitos. Os resultados mostraram que houve uma melhora nas propriedades de tração, flexão e resistência à umidade dos compósitos com a presença de parafina.

De acordo com BLEDZKI; REIHMANE e GASSAN (1998) e COUTINHO e COSTA (1999), é comum a utilização de graxas de polietileno ou polipropileno maleatado para o revestimento prévio das fibras de madeira, em etapa anterior à mistura em PE ou PP, a fim de facilitar a dispersão das fibras

na matriz apolar. Esse revestimento das fibras com o anidrido na presença de um iniciador (peróxido) forma uma película hidrofóbica na superfície das fibras hidrofílicas.

STARK e ROWLANDS (2003) também estudaram o efeito do agente compatibilizante nas propriedades dos compósitos. O uso do agente compatibilizante causou maior aumento na resistência dos compósitos de fibra de madeira do que nos compósitos de pó. Entretanto, o compatibilizante não afetou os módulos de elasticidade e ruptura. Os testes mostraram que o aumento na proporção do agente compatibilizante resultou no aumento na resistência à tração dos compósitos plástico-madeira.

As pesquisas envolvendo o uso de agentes compatibilizantes e outros aditivos tornam-se mais importantes na medida em que as formulações dos compósitos plástico-madeira ficam mais complexas (CLEMONS, 2002).

De acordo com SPECIALCHEM (2003), à medida que os compósitos plástico-madeira conseguem penetrar em novos mercados, as exigências quanto a determinadas características e desempenho também aumentam. E, para atender a necessidade desse mercado, os fornecedores de aditivos também seguem pesquisando novos produtos.

### 3.2.6 Outros Métodos

Existem ainda vários métodos físicos e químicos que podem ser aplicados nas fibras de madeira ou nos polímeros com o objetivo de modificar determinadas características desses materiais e, assim, melhorar as propriedades dos compósitos (BLEDZKI; REIHMANE; GASSAN, 1998).

KAMDEM et al. (2004) utilizaram materiais reciclados na produção dos compósitos. A madeira utilizada foi procedente de uma remoção após 21 anos de uso. A espécie foi Pinus tratado com CCA (cobre-cromo-arsênio). Os

compósitos plástico-madeira produzidos com esse material apresentaram maior resistência quanto a fotodegradação e aos ataques biológicos.

Dentre os métodos físicos para aumentar a durabilidade de compósitos à base de fibras celulósicas e plásticos, podem ser citados a pré-secagem da madeira, tratamentos térmicos, aplicação de pressão, descarga elétrica e macerização entre outros. Os métodos químicos incluem a impregnação das fibras, copolimerização, tratamento das fibras com isocianatos, grupo metanol, silanos e outros (BLEDZKI; GASSAN, 1999).

CARASCHI e LEÃO (2002b) trabalhando com compósitos plástico-madeira, utilizaram dois métodos para a modificação da superfície das fibras da madeira: tratamento alcalino das fibras em solução de hidróxido de sódio (NaOH, 10%) por 1h; e tratamento por descarga corona à 7,5 kV por um período de 2h. Os resultados mostraram que os tratamentos das fibras não interferiram nas propriedades mecânicas dos compósitos.

PICKERING et al. (2003) também fizeram um pré-tratamento das fibras de madeira usando solução de hidróxido de sódio (2%). Depois as fibras foram tratadas com gama-aminopropiltriétoxissilano (GS) e diclorodietilsilano (DCS) obtendo concentrações de até 3,2% na superfície das fibras. Os compósitos foram produzidos com 5, 10 e 20% de madeira tendo como matriz o polietileno. Foram obtidos aumentos na resistência à tração em todos os tratamentos para compósitos com 5% de madeira. Nenhuma melhora foi obtida para maiores conteúdos de madeira. Os autores concluíram que o pré-tratamento e os tratamentos não tiveram efeitos significativos na resistência à tração dos compósitos.

COUTO et al. (2002) pesquisaram o efeito do tratamento das fibras de sisal com plasma de oxigênio, nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os autores compararam os compósitos tratados com plasma com compósitos sem tratamento e com PPMA. Para os testes de tração, os compósitos tratados com plasma de oxigênio e os não tratados não apresentaram diferenças significativas. Já os compósitos com PPMA apresentaram um ganho de 25% na propriedade de tração.

COLOM et al. (2003) estudaram o pré-tratamento das fibras de madeira com silano e um polietileno maleatado. Os resultados dos ensaios de tração mostraram que, comparados com os compósitos com fibras não tratadas, os dois pré-tratamentos apresentaram melhores resultados, sendo que o pré-tratamento com o silano foi o melhor. O compósito tratado com silano teve uma melhora de 57% na propriedade de tração em relação ao compósito sem tratamento.

De acordo com SPECIALCHEM (2004), normalmente, é requerida uma fonte de radicais livres para iniciar os processos de copolimerização. Os iniciadores de radicais livres são substâncias químicas que, sob certas condições, iniciam reações químicas produzindo radicais livres. Essas reações podem se iniciar por processos térmicos. Na maioria dos casos, os peróxidos orgânicos são usados como fonte de radicais livres e são cruciais para o controle das reações e para as propriedades finais dos polímeros.

Segundo BARBOSA (2004), a polimerização iniciada por radicais ocorre facilmente com alquenos que possuem ligações duplas pouco substituídas. Alquenos são hidrocarbonetos que apresentam uma ou mais ligações duplas, por exemplo, o polipropileno. A reação ocorre tratando-se o alqueno com quantidade catalítica de um peróxido (RO-OR), o qual se decompõe sob aquecimento e forma radicais RO· que iniciam o processo de polimerização.

O mecanismo dessa reação envolve várias etapas. Após a decomposição do peróxido (etapa de iniciação), os radicais RO adicionam-se ao alqueno, formando um novo radical alquila. Esse radical, por sua vez, reage com outras moléculas de alqueno, originando um radical polimérico (etapa de propagação). O término do crescimento da cadeia envolve qualquer reação que resulte na destruição desses radicais alquila. Isso pode ocorrer pela reação entre dois radicais quaisquer, ou pela abstração, por um radical alquila, de um átomo de hidrogênio do carbono vizinho ao carbono radicalar, resultando na formação de um alqueno (etapa de terminação) (BARBOSA, 2004).

Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados, uma vez que os peróxidos orgânicos são passíveis de decomposição exotérmica quando submetidas a temperaturas elevadas ou mesmo à temperatura normal. A decomposição pode ser iniciada por calor, contato com impurezas (por exemplo, ácidos, compostos de metais pesados e aminas entre outros) e atrito ou impacto.

A taxa de decomposição aumenta com a temperatura e varia com a formulação do peróxido orgânico. A decomposição pode provocar despreendimento de gases ou vapores nocivos ou inflamáveis. Certos peróxidos orgânicos devem ter sua temperatura controlada durante o transporte. Alguns peróxidos podem decompor-se de forma explosiva, particularmente se confinados. Esta característica pode ser modificada pela adição de diluentes ou pelo uso de embalagens adequadas. Muitos peróxidos orgânicos queimam vigorosamente (SPECIALCHEM, 2004).

### 3.3 PROCESSOS DE MOLDAGEM

#### 3.3.1 Extrusão

A madeira e o plástico podem ser combinados usando a tecnologia da mistura por aquecimento e fusão. A produção do compósito plástico-madeira, normalmente, envolve o processo de extrusão. As matérias-primas (plástico e madeira) são misturadas em uma extrusora, formando os granulados (YOUNGQUIST, 1995; CLEMONS, 2002).

Para SAHEB e JOG (1999), o processamento de compósitos plástico-madeira envolve a extrusão dos ingredientes a uma determinada temperatura de fusão seguida por uma operação de injeção para dar a forma aos objetos.

A vantagem do compósito plástico-madeira é sua capacidade de ser processada como o plástico. O material pode ser injetado e produzir peças sem a necessidade de outros acabamentos. O compósito também pode ser transformado em lâminas e moldados como os plásticos (KOENIG; SYPKENS, 2002).

WOLCOTT (2001) e KOENIG e SYPKENS (2002) advertem que quando se mistura a madeira e o plástico é necessário fazer certas acomodações para que não ocorram inconsistências no produto como a separação de materiais ou empenamento. Muitas tecnologias para o processamento já estão patenteadas. Podem ser citadas: a tecnologia para secagem do pó de madeira até 0% de umidade; o equipamento para misturar e distribuir uniformemente uma pequena quantidade de plástico com uma grande quantidade de pó de madeira, ou ainda o processo de extrusão para produção de lâminas (filmes).

Os fabricantes de perfis têm desenvolvido sistemas para usar esses compósitos. Algumas linhas também produzem os perfis diretamente a partir da extrusora (sem a formação de granulados). Esses sistemas são compostos por um alimentador para madeira (até 80% em peso), extrusora com dupla rosca, unidade de degasamento para eliminar a umidade e voláteis da madeira, uma bomba ou descarregador e o molde. A linha ainda pode ser completada com uma unidade de injeção de gás para reduzir a densidade dos perfis (BRITISH PLASTICS & RUBBER, 2000).

No Brasil, um fabricante de extrusoras em Joinville-SC desenvolveu uma linha de equipamentos para compósitos plástico-madeira. O equipamento básico consiste numa extrusora monorroscas, sem sistema de degasagem e com sistema de corte seco. A empresa estava desenvolvendo também um sistema de peneiras rotativas para seleção do tamanho das partículas de madeira antes de entrar no processo.

No início de 2003 a linha foi instalada na cidade de Bento Gonçalves-RS. Durante a visita à fábrica em maio de 2003, a produção de compósitos plástico-madeira ainda estava em fase de testes. Segundo o

proprietário, havia uma série de problemas técnicos tanto no processamento quanto no equipamento que necessitava serem solucionados. Dentre os problemas foram citados: sistema para secagem da madeira; sistema de alimentação da extrusora e ajustes das temperaturas entre outros.

Segundo BLEDZKI, REIHMANE e GASSAN (1998) os principais problemas no processamento de compósitos plástico-madeira são:

- a) variação na qualidade da matéria-prima plástica (especialmente se for reciclada);
- b) limitações na compatibilidade devido às características hidrofílicas da madeira e hidrofóbicas do polímero;
- c) baixa estabilidade térmica durante o processamento;
- d) as rigorosas condições de processamento (cisalhamento e temperaturas altas).

KOENIG e SYPKENS (2002) apresentam alguns pontos básicos para o processamento dos compósitos plástico-madeira:

- a) sempre manter as temperaturas do processo o mais baixo possível. Temperaturas abaixo de 200° C são recomendadas para evitar a queima da madeira. Sempre permitir adequada saída de gases. A umidade resultante do processo de extrusão precisa ter uma saída da extrusora (sistema de degasagem);
- b) o aumento do índice de fluidez (MFI) da resina diminuirá a temperatura dentro da rosca. Ainda, permite duas ou três zonas de mistura na configuração da rosca. Quanto mais uniforme a mistura, menor poderá ser a temperatura do processo;
- c) extrusoras com rosca dupla parece ser melhor do que extrusoras com rosca simples para o processamento dos compósitos plástico-madeira.

Os fatores críticos no processamento, ainda segundo os mesmos autores, incluem a geometria da rosca da extrusora, a definição das temperaturas e a velocidade de avanço. A formulação do material influenciará

nos aspectos de mistura, fusão, homogeneização e pressão gerada, que precisam estar sincronizadas com a extrusora.

Para o processamento do plástico-madeira pode ser recomendado a extrusora de dupla rosca cônica. Essas extrusoras são desenhadas para melhor conduzir materiais muito “fofos” ou leves, como as fibras de madeira. A compressão natural das roscas duplas ajuda a eliminar a umidade existente. Um sistema de vácuo pode ser efetivo na retirada dos voláteis durante a extrusão (KOENIG; SYPKENS, 2002).

De acordo com ROSE (2002) os equipamentos para o processamento dos compósitos apresentam alguns desafios na parte do resfriamento e no processamento propriamente dito. Devido à complexidade dos materiais envolvidos, os requisitos para as operações de mistura e condução da matéria, são diferentes dos plásticos convencionais.

Novas extrusoras para a produção de compósito plástico-madeira estão sendo apresentadas. Como exemplos podem ser citadas as modificações no sistema de alimentação, onde os polímeros e as fibras são alimentados em separado. São equipamentos que permitirão a produção mais eficiente de decks usando o WPC (HAUGHEY, 2002).

Segundo MAPLESTON (2001) alguns fabricantes estão apresentando novas tecnologias para a extrusão dos compósitos plástico-madeira que são muito diferentes dos processos convencionais de extrusão.

De acordo com a REVISTA DO PLÁSTICO (2002), os fornecedores de extrusoras (americanas e européias) já possuem vários sistemas que extrudam plástico com fibras de madeira. Um dos sistemas consiste em um sistema de dupla extrusão, no qual, primeiro a resina é fundida em uma rosca única, enquanto se alimenta uma outra extrusora de dupla rosca ainda vazia com as fibras de madeira úmidas. As fibras são ventiladas e secas nessa dupla rosca. Após isso, é injetada a resina fundida, que encapsula as fibras. O compósito é misturado e extrusado em um cabeçote.

Outro sistema consiste numa extrusora equipada com um alimentador vertical especial para lidar com a baixa densidade das fibras e que também possui mecanismo de compressão para remover a sua umidade. Um sistema alemão para operar com fibras de madeira, também dispensa pré-secagem das fibras. O sistema se baseia em uma extrusora de dupla rosca para composto, que funde a resina, e na qual uma bomba de rosca única alimenta de fibra. A mistura é transferida, ao mesmo tempo em que ocorre ventilação para secar a fibra, para uma extrusora co-rotativa finalizar o processo (REVISTA DO PLÁSTICO, 2002).

Para LU, WU e NEGULESCU (2004) o sistema de processamento influencia diretamente a qualidade da mistura plástico-madeira, que interfere na interface de adesão e afeta as propriedades mecânicas.

Os diferentes métodos de processamento dos compósitos plástico-madeira também proporcionam superfícies com características diferentes. Essas características irão influenciar as propriedades mecânicas, principalmente, quando os compósitos ficam expostos às condições do tempo (STARK; MATUANA; CLEMONS, 2004).

Segundo MARKOVICH, REBOREDO e ARANGUREN (2001) e KACZMAREK e WORTBERG (2004) com base em todas as peculiaridades, os maiores fabricantes de equipamentos tais como Bauzzano, Davis-Standard, Leistritz, Millacron Inc. e Krupp Werner & Pfleiderer, entre outros, continuam buscando a melhor configuração de máquina para processamento de compósitos plástico-madeira. De uma forma geral os equipamentos podem ser classificados em quatro categorias distintas:

- a) Madeira pré-secada e mistura pré-homogeneizada: nesse processo 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. A mistura polímero-madeira e aditivos é preparada em misturadores antes de ser

alimentada na extrusora. Esse sistema é muito utilizado para processamento de termoplásticos com baixa estabilidade térmica como o PVC.

- b) Madeira pré-secada e alimentação polímero-madeira em separado: nesse processo a resina e a fibra são alimentadas em separado propiciando um melhor controle do tempo de residência da carga de madeira durante o processamento. São normalmente utilizadas extrusoras de rosca-dupla de grande capacidade, com portas laterais de alimentação, onde a fibra é misturada ao polímero fundido, passando por zonas de mistura distributiva e zonas de desgaseificação da umidade residual.
- c) Madeira úmida primeiro; alimentação do polímero fundido: nesse processo são necessárias duas extrusoras que operam simultaneamente; uma extrusora primária secando a madeira e uma outra menor plastificando o polímero e os aditivos. A empresa Davis-Standard dos EUA patenteou um equipamento com essas características.
- d) Madeira úmida primeiro; alimentação em separado: nesse processo a madeira pode ser alimentada ainda úmida na zona de alimentação e a mistura de resina e aditivos introduzida posteriormente na extrusora através de um alimentador lateral. Todavia esse processo requer normalmente equipamentos com roscas muito longas com uma relação comprimento/diâmetro alta ( $L/D$  44) e com zonas de degasagem próximas à zona de alimentação para remoção da umidade da madeira, o que nem sempre é possível.

Nos processos nos quais a extrusora é utilizada na secagem da farinha de madeira, pode haver problemas de consistência da massa fundida devido a alterações de umidade. Os custos associados a essa prática ainda têm sido objeto de calorosas discussões entre fabricantes de equipamentos e

processadores. Dessa forma, a alternativa mais segura ainda tem sido a utilização de madeira pré-secada adquirida junto aos fornecedores de farinha/fibra de madeira (MARKOVICH; ARANGUREN; REBOREDO, 2002).

### 3.3.2 Prensagem

Outro processo que também vem sendo pesquisado é a fabricação de painéis a partir de compósitos plástico-madeira. SELLERS, MILLER e KATABIAN (2000) utilizaram termoplásticos e madeira reciclados na fabricação de chapas plástico-madeira. As misturas foram feitas na proporção de 50%. As características físicas dos painéis plástico-madeira variaram de acordo com a densidade da madeira utilizada. Os dados foram comparados com valores padrões de chapas de aglomerado. Todos os painéis plástico-madeira apresentaram inchamento em espessura menor que o aglomerado.

KOENIG e SYPKENS (2002) citam um teste feito pela Universidade de Wiscosin comparando painéis de WPC com painéis tradicionais. O material usado foi pó de madeira (40 mesh), combinado com uma mistura de 50% de polietileno e 50% de polipropileno. Foram testadas formulações com 20% a 60% em peso, de pó de madeira. Foram produzidos painéis de 50 cm x 50 cm e espessura de 12 mm, onde foram comparados com compensado, OSB (Oriented Strand Board), aglomerado, chapas duras e MDF (Medium Density Fiberboard).

O estudo revelou que a performance dos compósitos plástico-madeira foi inferior aos painéis a base de madeira com exceção para o módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Uma performance superior do WPC foi observada no teste para inchamento em espessura. O WPC apresentou menos de 1% de absorção de água enquanto a maior taxa de absorção nos painéis de madeira foi de 40%. O estudo mostrou que apenas o MDF teve uma estabilidade similar aos painéis de compósito plástico-madeira.

BOEGLIN, TRIBOULOT e MASSON (1997) produziram chapas a partir de resíduos de madeira e plástico (numa proporção em peso de 3 : 1). As chapas foram obtidas por simples aquecimento e prensagem. Os testes mecânicos mostraram que a resistência à flexão é próxima aos resultados apresentados pelas chapas de aglomerado. Outros testes de sucessivas reciclagens das chapas de compósitos, sem nenhum aditivo, mostraram um pequeno decréscimo nas propriedades mecânicas das chapas obtidas, quando comparadas com as chapas originais.

O IBAMA também está pesquisando chapas compostas de plástico-madeira. O experimento está sendo feito com madeira das seringueiras. Uma vantagem encontrada na madeira plástica em relação ao aglomerado foi a resistência à umidade. O produto também é de difícil degradação por fungos (SATO, 2000).

Apesar dos estudos envolvendo o método de prensagem, de acordo com SPECIALCHEM (2003), o mercado de compósitos plástico-madeira é dominado por extrudados, sendo que as peças injetadas também estão aumentando sua participação no mercado.

### 3.4 APLICAÇÕES

Os compósitos plástico-madeira já estão sendo utilizados na fabricação de uma série de produtos. As aplicações vão desde brinquedos até construções marinhas. Entretanto, YOUNGQUIST (1995) adverte que os compósitos plástico-madeira não são adequados para a produção de produtos com função estrutural.

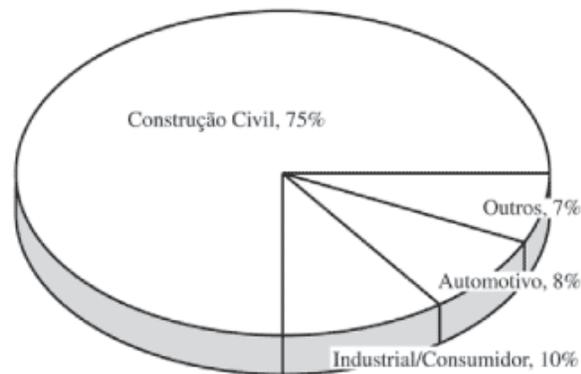
O compósito plástico-madeira tem uma absorção de água negligenciável, o que torna o produto ideal para aplicações exteriores. O material não apresenta os problemas comuns à madeira, quando submetidas a condições de muita umidade, como rachaduras, empenamentos e

apodrecimento. O WPC está sendo utilizado na fabricação de produtos como quiosques, mesas, cadeiras, floreiras, brinquedos de playground e pontes para atender projetos de jardinagem, piscina e área de recreação (KOENIG; SYPKENS, 2002).

Esta indicação de aplicação externa é corroborada por SPECIALCHEM (2003), segundo a qual, as principais aplicações dos compósitos plástico-madeira são em produtos para construção como decks, cercas, acabamento para paredes e peças decorativas (portas e janelas). Outras aplicações incluem pisos para uso externo, construções marinhas, interior de automóveis e caminhões, paletes e equipamentos para playground entre outros.

A maior fatia do mercado para esses produtos está nos Estados Unidos, principalmente na construção de decks para piscina. Os produtos estão nas formas de perfis para pisos e assoalhos, batentes de janelas e portas, revestimentos dentre muitas outras aplicações. Os principais mercados para os compósitos por aplicação final do produto são mostrados na FIGURA 4 (ENGLISH, 2000b).

FIGURA 4 – PRINCIPAIS MERCADOS PARA COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA NOS ESTADOS UNIDOS EM 2000.



FONTE: ECKERT (2000)

CARLTON (2000) cita que a demanda por madeira alternativa está aumentando nos Estados Unidos. Em 2000 os decks a base de compósitos plástico-madeira já representavam cerca de 5% do mercado americano de decks.

As expectativas são de que até 2005, os decks fabricados com o compósito plástico-madeira atingirão 10% do mercado americano (KOENIG; SYPKENS, 2002).

Em contraste com o mercado americano, o mercado britânico e a Europa em geral têm mostrado um desenvolvimento muito lento com relação aos compósitos plástico-madeira (OPTIMAT; MERL, 2003).

De acordo com AKV-TV (2004), na Alemanha o crescimento do uso de compósitos plásticos com fibras naturais (sisal, juta e madeira entre outras) foi de 5% entre 2002 e 2003. Esses materiais foram empregados principalmente no interior de portas e painéis de automóveis. Aproximadamente, são utilizados 16 kg de fibras naturais por veículo produzido na Alemanha.

Segundo REYNOLDS (2004), no Reino Unido existem apenas três indústrias que trabalham com compósitos plástico-madeira.

Mesmo assim, de acordo com BRITISH PLASTICS & RUBBER (2001), de 1995 a 2000 o consumo de compósitos plástico-madeira no Reino Unido tem crescido a uma taxa próxima a 100% ao ano.

No Reino Unido, os decks produzidos com compósito plástico-madeira representam 10% do mercado britânico. A aplicação predominante tem sido para uso externo como decks e cercas. Entretanto, com os avanços tecnológicos, novas aplicações continuam a aparecer como o uso em janelas. As primeiras aplicações dos compósitos foram para mesas de piquenique, equipamentos de playground e cercas entre outros. Depois apareceram as tábuas para decks com uma aparência mais consistente, maior rigidez e com baixa manutenção. A seguir vieram as linhas de janelas e outras aplicações em portas e batentes, com performance para longa duração, aparência homogênea e estabilidade dimensional. Pesquisas estão sendo conduzidas

para desenvolver o compósito plástico-madeira para as condições marinhas (BRITISH PLASTICS & RUBBER, 2001).

Uma das vantagens dos pisos fabricados a partir dos compósitos é que oferecem melhores características antiderrapantes sob condições seca ou úmida e tem uma baixa absorção de umidade. Os compósitos estão sendo utilizados na fabricação de: base para escovas e vassouras, batente de portas, pequenos painéis e em várias aplicações onde possa substituir a madeira. O Japão está produzindo granulados de pó de madeira com polietileno ou polipropileno virgem. As indústrias japonesas também estão desenvolvendo pesquisas para atender aos consumidores com relação ao design, processamento e acabamento dos compósitos plástico-madeira (KOENIG; SYPKENS, 2002).

De acordo com WARDEL (2002), uma das melhores alternativas para a construção de decks é o compósito plástico-madeira. Eles são de fácil instalação, requerem baixa manutenção, não têm problemas com ataque de insetos, suportam a umidade e tem um custo final comparável a determinados decks de madeira.

MOLINARO (2003) cita que um deck a base de compósito plástico-madeira pode simular toda a beleza da madeira, tem longa durabilidade, alta resistência tanto em ambiente seco quanto úmido e requer pouca manutenção. Uma das vantagens está na facilidade de instalação do produto, pois as tábuas de compósitos podem ser fixadas com grampos e proporcionam uma superfície sólida, não absorvem a umidade além de não apresentarem rachaduras ou empenamentos.

Além do piso, os compósitos plástico-madeira estão tendo outras aplicações dentro das casas. O material está sendo utilizado na fabricação de peças de móveis, decoração e molduras (KOENIG e SYPKENS, 2002).

De acordo com KACZMAREK e WORTBERG (2004) a empresa EIN Engineering, do Japão, mostrou também que é possível a construção de paredes com função de proteção acústica. Em ambientes internos, os perfis de

compósito plástico-madeira são encontrados nas molduras das portas, portas inteiras, canaletas ou mesmo conduítes para cabos.

Ainda, segundo os mesmos autores, uma aplicação adicional interessante deste conceito são os materiais constituídos a partir de compósitos plástico-madeira, com efeito bactericida integral, que já foram patenteados pela EIN, e que são aplicáveis em clínicas, quartos de hospital ou banheiros, onde há um risco elevado de infecção.

Com relação ao custo CARLTON (2000) cita que um deck de tamanho médio construído com compósito plástico-madeira pode custar até 15% mais caro que um deck de madeira. Entretanto, o consumidor acaba economizando porque o compósito tem um menor custo de manutenção ao longo prazo.

REYNOLDS (2004) cita que, no mercado americano, em geral os preços dos decks à base de compósitos plástico-madeira são competitivos com os decks a base de madeira de folhosas, mas, são mais caros que os decks a base de madeira de coníferas tratadas.

### 3.5 PERFORMANCE

De acordo com COLOM et al. (2003), as propriedades dos compósitos plástico-madeira dependem do conteúdo de madeira e da presença de aditivos.

SAHEB e JOG (1999), KOENIG e SYPKENS (2002), STARK, MATUANA e CLEMONS (2004) discutem que as características dos compósitos também são influenciadas pelo método de processamento.

Para CLEMONS (2002) a grande variedade de compósitos plástico-madeira existente torna difícil uma discussão sobre a performance desses compósitos.

Segundo KOENIG e SYPKENS (2002) uma das vantagens na performance dos compósitos plástico-madeira é a capacidade para manipular algumas características como a rigidez. Outra característica é a maior resistência ao ataque de fungos e insetos. O material apresenta ainda uma grande estabilidade dimensional, pois absorve menos umidade que a madeira. O custo de fabricação de produtos à base de compósito plástico-madeira, geralmente, é maior que o seu equivalente em madeira. Entretanto, os compósitos são mais fáceis de trabalhar, o que faz com que o custo total seja menor. A fundamental vantagem em relação à madeira é que os compósitos podem ser moldados para produzir formas complexas.

O sucesso comercial dos compósitos plástico-madeira tem mostrado a necessidade da comprovação da durabilidade e da performance desses materiais. Nesse sentido, pesquisas científicas têm sido desenvolvidas para investigar as propriedades e o comportamento dos compósitos plástico-madeira (WOLCOTT; ENGLUND, 1999).

GONZALEZ e MYERS (1993) pesquisaram o efeito da temperatura sobre a madeira durante o processo de fusão do plástico nas propriedades dos compósitos plástico-madeira. Os resultados mostraram que perdas nas propriedades mecânicas da madeira durante a extrusão do compósito não alteram significativamente as propriedades do compósito. Entretanto, extrusões sucessivas do mesmo material podem ser prejudiciais.

KIM, RYU e PARK (1998) utilizaram o polipropileno e pó de madeira na fabricação de compósitos plástico-madeira em uma extrusora de rosca simples. O percentual de pó de madeira utilizado foi de até 50% em peso. O módulo de tensão aumentou com o aumento do pó de madeira, mas a resistência à tração e a resistência ao impacto diminuíram. A redução das propriedades foi atribuída às altas temperaturas do processo que causaram a decomposição do pó de madeira.

Para solucionar esse problema, os autores sugerem que devem ser observadas as condições de processamento como o ajuste das temperaturas,

velocidade da rosca, pré-tratamento da madeira e as diferentes temperaturas de fusão dos polímeros.

Outro fator que influencia as propriedades dos compósitos é a umidade. STARK (2001) estudou a influência da absorção da umidade nas propriedades mecânicas do WPC. Foram testadas composições com 20% e 40% (em peso) de pó de madeira com a matriz de polipropileno. Não foi observada nenhuma degradação significativa em suas propriedades.

JOSEPH et al. (2002) também concluíram que o aumento do conteúdo de fibras aumenta a absorção de umidade no compósito plástico-madeira. Entretanto, o uso de aditivos pode reduzir a taxa de absorção.

O aumento da umidade no compósito favorece o aparecimento de fungos. MANKOWSKI e MORRELL (2000) estudaram o comportamento dos compósitos plástico-madeira submetidos ao ataque de fungos degradadores. A avaliação foi feita em termo de perda de peso e mudanças anatômicas. Três composições de compósitos foram avaliadas. A composição que apresentou maior suscetibilidade ao ataque dos fungos foi a que continha maior percentual de madeira (70%). As duas outras composições apresentaram um ataque muito pequeno ou não sofreram ataque.

PENDLETON et al. (2002) também avaliaram diferentes formulações do compósito plástico-madeira ao ataque de fungos degradadores. Os testes foram conduzidos em laboratórios, onde pequenas amostras de compósitos foram expostas diretamente aos fungos. Os resultados mostraram que não houve perda no peso causado pelo ataque dos fungos. As formulações com alto conteúdo de madeira (50%) e sem preservativos apresentaram perdas moderadas. Entretanto, com a adição de borato de zinco (2%), as perdas foram nulas.

MUSLICH e NURWATI (1997) compararam três espécies de madeira tratada com CCA (cobre-cromo-arsênio) e três tipos de compósitos plástico-madeira, com a madeira sólida tradicionalmente usada nas construções marinhas. Os resultados mostraram que tanto a madeira tratada

quanto os compósitos podem não ser atacados por agentes marinhos e podem substituir as tradicionais madeiras usadas nas construções marinhas.

De acordo com MALVAR, PENDLETON e TICHY (2001), os compósitos plástico-madeira também estão sendo estudados pela marinha americana. Um dos objetivos foi comprovar a maior durabilidade do compósito em relação à madeira quando submetidas às severas condições marítimas. Entretanto, a durabilidade envolve além da integridade estrutural e os efeitos da biodeterioração, a performance contra o fogo.

STARK, WHITE e CLEMONS (1997) testaram a performance de várias composições de compósito plástico-madeira com relação ao fogo. Os resultados mostraram que, quanto maior a concentração de polipropileno ou polietileno, maior é a liberação de calor no compósito.

Qualquer compósito plástico-madeira que não contenha um preservativo de madeira fica dependendo da barreira de proteção formada pela matriz polimérica para evitar o ataque de agentes biodegradadores. Entretanto, uma redução na quantidade de madeira no compósito pode ser eficaz na prevenção ao ataque de fungos (PENDLETON et al., 2002).

Outro problema que pode ocorrer com os compósitos quando exposto ao tempo, é a perda ou mudança na coloração e/ou a perda nas propriedades mecânicas. Compósitos com maior percentual de madeira exposta na superfície foram as que apresentaram os maiores percentuais de perda nas propriedades quando submetidas a testes de degradação ao longo do tempo (STARK; MATUANA; CLEMONS, 2004).

### 3.6 TENDÊNCIAS

Segundo as previsões da REINFORCED PLASTICS (2004), nos Estados Unidos, a demanda por produtos à base de compósito plástico-madeira deverá crescer uma média de 12% ao ano até 2008. Esse crescimento está em função da utilização dos compósitos no desenvolvimento de novos produtos; da familiarização por parte dos consumidores com os produtos à partir de compósitos plástico-madeira; do interesse dos consumidores em diminuir a manutenção e da facilidade de manuseio dos materiais.

Para NETCOMPOSITES (2004), apenas o setor de decks de compósitos plástico-madeira deverá representar um terço do mercado americano até 2010.

A proibição por parte do governo americano do uso do CCA no tratamento da madeira também deverá ser um dos fatores a impulsionar o uso de materiais alternativos como os compósitos plástico-madeira, principalmente na fabricação de decks (KOENIG; SYPKENS, 2002).

Entretanto, as áreas de maior crescimento para os compósitos plástico-madeira continuam sendo os perfis para janelas, lâminas (filmes) para interior de carros e partes para a fabricação de decks. Para as áreas de compostos e masterbatches também se observa um crescimento, porém, mais lento (SCHUT, 1999).

Com o aumento dos produtos compósito plástico-madeira no mercado, é muito importante que as propriedades deste material sejam mais precisamente determinadas (BRANDT; FRIDLEY, 2003).

Em resposta a essas necessidades, a American Society for Testing and Materials (ASTM) criou uma comissão para estudar e determinar as normas técnicas para os compósitos plástico-madeira (ENGLISH, 2000b).

Na verdade, de acordo com CLEMONS (2002), a ASTM já desenvolveu dois modelos para definir os testes padrões para o compósito plástico-madeira.

MALVAR, PENDLETON e TICHY (2001) também estudaram várias normas americanas existentes sobre o comportamento de materiais. Para que o compósito plástico-madeira possa ser avaliado dentro das normas alguns critérios precisam ser modificados. Segundo os autores, alguns testes necessitam ter os métodos adaptados para poder avaliar o compósito plástico-madeira.

Embora as normas para avaliação de performance ainda estejam em estudo, ENGLISH (2000a) adverte que a primeira geração de compósito plástico-madeira nem sempre apresentou bom desempenho em ambientes exteriores.

Entretanto, conforme avança as pesquisas, melhora a performance dos compósitos plástico-madeira. No futuro deverá ser desenvolvido um produto que atenda a funções estruturais (ENGLISH, 2000a).

Os compósitos estão sendo examinados também para aplicações estruturais e em usos externos em condições adversas, embora ainda não estejam sendo utilizados comercialmente (BENDER; WOLCOTT, 2001 e STARK, 2001).

GARDNER e O'NEIL (2000) testaram sistemas de colagem de compósitos plástico-madeira para a produção de vigas.

De acordo com LAVERTY (2002), as últimas tendências na área de compósitos de madeira têm sido combinar a madeira com outros materiais para produzirem novas tecnologias e novos materiais e com isso dar mais vigor a economia de produtos florestais.

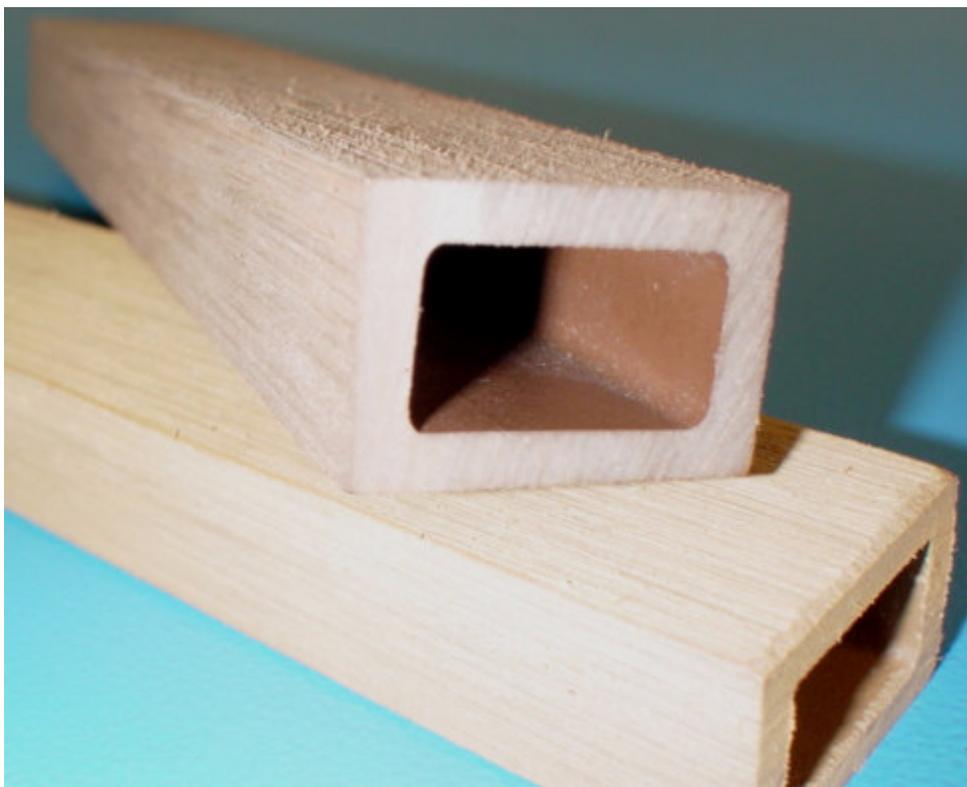
O CRW (composite-reinforced wood) é um híbrido dessa nova classe de materiais resultante da combinação da madeira com FRPs (fiber-reinforced polymers). O CRW está sendo desenvolvido para ser um compósito de madeira com função estrutural.

KOENIG e SYPKENS (2002) afirmam que as pesquisas com os compósitos plástico-madeira estão buscando formulações para conseguir cada vez mais, maior proximidade com a madeira.

Além das pesquisas com formulações para aproximar os compósitos com a madeira, existe também a pesquisa para tratamentos ou acabamentos de superfícies.

A FIGURA 5 mostra a superfície de amostras de compósitos (50%madeira + 50%PP) produzidos pela empresa Ein do Japão.

FIGURA 5 – AMOSTRAS DE UM PERFIL FABRICADO A PARTIR DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA (50%MADEIRA + 50%PP) PRODUZIDOS PELA EIN



Observa-se que na superfície interna das amostras (sem o tratamento) a aparência do material lembra o plástico. Já a superfície externa (com o tratamento) ganhou uma maior proximidade com a madeira.

Segundo AKV-TV (2004), uma nova tecnologia de processamento de compósitos foi feita em 2003: é um processo de injeção de fibras naturais moldadas com matriz de polipropileno. Esta tecnologia está sendo considerada como um grande potencial para a indústria automobilística, devido às propriedades mecânicas, densidade e preço.

Embora a viabilidade técnica para produção de compósitos plástico-madeira seja uma realidade em alguns países, no Brasil ainda existe certa relutância por parte das indústrias para empregar essa tecnologia. Na maioria dos casos, essa relutância é decorrente da falta de informações técnicas sobre os materiais e os processos, de certificação local de fornecedores de matéria-prima, ausência de equipamentos específicos e desenvolvimentos de novos mercados para esses produtos (CORREA et al., 2003).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

As formulações para a produção do compósito plástico-madeira envolveram a madeira, o termoplástico e o compatibilizante.

#### 4.1.1 Madeira

A madeira utilizada tanto nos testes preliminares como para a produção do compósito plástico-madeira foram os resíduos gerados por uma indústria de compensados localizada na região de Curitiba-PR. A indústria processa apenas madeira de folhosas oriundas da região Norte do Brasil. As espécies mais utilizadas são a copaíba (*Copaifera* sp) e a amescla (*Trattinickia* sp). De acordo com dados da empresa, a densidade dessas espécies varia entre 0,60 e 0,70 g/cm<sup>3</sup>. Os resíduos utilizados foram o pó da lixadeira-calibradora e a serragem da esquadrejadeira.

Ainda, segundo dados da empresa pode se dizer que, para cada 100 m<sup>3</sup> de madeira que chegam à esquadrejadeira são gerados aproximadamente 5 m<sup>3</sup> de serragem, considerando as densidades dos produtos (ver item 5.2.2), o restante sai na forma de refilo. Havendo o desintegrador na esquadrejadeira, esse volume de serragem pode ser até cinco ou seis vezes maior. Da mesma forma, na calibradora e lixadeira são gerados aproximadamente 40 m<sup>3</sup>/dia de pó-de-lixia, considerando uma densidade de 0,14 g/cm<sup>3</sup> para o pó-de-lixia.

Antes de se iniciar o processo da produção do compósito plástico-madeira foi feita uma análise da madeira para a caracterização do material quanto ao tamanho das partículas e ao seu conteúdo de umidade. A partir dos materiais, serragem e pó-de-lixia, coletados na indústria, foram retirados

amostras para as análises granulométricas bem como para a determinação da densidade aparente e do teor de umidade dos materiais. As análises foram conduzidas nos laboratórios de Polpa e Papel do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal - DETF do Curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPR.

#### 4.1.2 Plástico

Nesse estudo foram utilizados dois tipos de polímeros: o polietileno de baixa densidade (PEBD) reciclado e o polipropileno (PP) virgem. A escolha do PEBD reciclado foi por ser o material disponibilizado pela empresa onde foram realizados os testes preliminares.

De acordo com MASSON (1998) e CANEVAROLO (2002) o PP virgem possui grande versatilidade, propriedades favoráveis e baixo custo, por esta razão, optou-se pelo uso do polipropileno.

O PEBD reciclado foi utilizado apenas nos testes preliminares, aqui denominados de “produção piloto”. O PP virgem foi o polímero utilizado em todas as formulações para a produção dos compósitos plástico-madeira.

#### 4.1.3 Compatibilizante

Embora a maioria dos estudos desenvolvidos tenha utilizado o compatibilizante comercial polipropileno maleatado (PPMA), nessa pesquisa optou-se pela extrusão reativa. Assim sendo, foi utilizado o anidrido maleico como agente compatibilizante e o peróxido de dibenzoila como iniciador da reação de modificação do polipropileno para obtenção do PPMA.

As concentrações de anidrido maleico e peróxido foram realizadas na proporção de 4 : 1. Foram programadas as produções de PPMA nas concentrações de 1%, 2% e 3% de anidrido maleico.

## 4.2 EQUIPAMENTO

A produção do compósito plástico-madeira foi realizada pelo processo de extrusão. A seguir são apresentados os equipamentos que foram utilizados nesse estudo: nos testes preliminares; nas análises químicas; na produção dos compósitos plástico-madeira; nos ensaios para avaliar as propriedades físicas e mecânicas e na obtenção dos produtos finais.

### 4.2.1 Testes Preliminares

Os testes preliminares para a produção do compósito plástico-madeira foram realizados na Indústria Roguiplast, localizada no município de Bauru-SP.

Para o processamento foram utilizados os equipamentos convencionais de uma recicladora de plástico, sem nenhum tipo de modificação nos equipamentos.

A separação do PEBD foi feita a partir dos fardos de sacos plásticos e embalagens que a empresa comprava. Nessa operação foram selecionados materiais limpos e secos, evitando as fases de lavagem e secagem dos plásticos.

Para a preparação do PEBD reciclado foi utilizado o moinho de facas para picar o material selecionado. O material picado foi transferido para o aglutinador, com capacidade de 150 litros, para a aglutinação do plástico.

Na produção piloto foi utilizado uma extrusora monorroscas de 75 mm de diâmetro, rosca tipo universal, relação L/D (comprimento/diâmetro) de 28, com cinco zonas de aquecimento, sem sistema de degasagem, saída de 7 fios e corte via espaguete.

O ajuste das temperaturas nas cinco zonas de aquecimento ficou entre 135° C (nas zonas 1 e 2) 140° C (nas zonas 3 e 4) e 150° C (na matriz). A temperatura da água para resfriamento do espaguete foi de 20° C. O corte dos espaguetes foi feito num granulador de facas.

#### 4.2.2 Preparação da Madeira

Antes de se iniciar o processo da produção dos compósitos foi feita a análise da madeira para a caracterização física e química do material. A partir dos materiais, serragem e pó-de-lixas coletados na indústria, foram retiradas as amostras para as análises. Foram realizadas análises granulométricas, determinação da densidade aparente e do teor de umidade dos materiais.

Para as análises químicas, a serragem foi classificada de acordo com os métodos analíticos prescritos pelas normas técnicas.

O pó-de-lixas e a serragem passaram por um processo de secagem antes de serem utilizados nas formulações dos compósitos plástico-madeira. Os resíduos da madeira foram secos a  $105 \pm 3^\circ \text{C}$ , até atingirem peso constante, em secadores com capacidade de 1000 litros e com circulação de ar. A secagem dos resíduos foi feita nos laboratórios de Painéis da Madeira e de Polpa e Papel do DETF (Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal) do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPR.

Os testes de granulometria foram realizados no aparelho denominado granuteste, da marca Bertel modelo 1001 tipo magnético, do laboratório de Polpa e Papel do DETF do curso de Engenharia Industrial

Madeira da UFPR. Para os testes foi utilizado um conjunto de 4 peneiras (20, 40, 60 e 100 mesh) e o tempo de vibração do conjunto de peneiras foi de 30 min.

Para as análises químicas foram utilizados o aparelho de extração do tipo Soxhlet da marca Marconi, balança eletrônica com precisão 0,1 mg, estufa com capacidade de 500 litros e sem circulação de ar e equipamento para banho-maria da marca GSL, conjunto com bomba de vácuo (FIGURA 6), forno de microondas, dessecador, cadinhos de porcelana, além de vidrarias de laboratório (copos Becker, provetas, cadinhos filtrantes, vidro de relógio, bastões de vidro, pipeta entre outros) e reagentes como solução de álcool-tolueno, hidróxido de sódio, ácido acético, etanol e ácido sulfúrico.

FIGURA 6 – EQUIPAMENTO DE BANHO-MARIA E CONJUNTO COM BOMBA DE VÁCUO

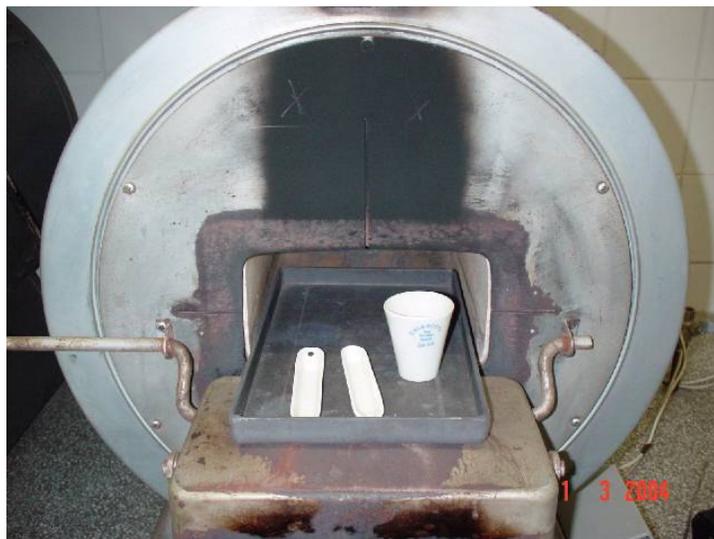


As análises químicas foram conduzidas nos laboratórios de Polpa e Papel do DETF do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPR.

A determinação do teor de cinzas e os testes para a determinação dos voláteis na madeira foram realizados no laboratório de Energia e Biomassa

do DETF do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPR. Foi utilizado um forno tipo mufla elétrica (FIGURA 7) com capacidade de aquecimento até 900° C.

FIGURA 7 - MUFLA



A norma TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) e outras referentes a análise química da madeira recomendam três tipos principais de frações granulométricas da serragem: a) fração 40 - fração da serragem que atravessa a peneira de 40 mesh (mesh = número de malhas por polegada linear, segundo a norma American Society for Testing and Materials - ASTM E 11-39), que corresponde a malha de 0,42 mm de abertura; b) fração 40/60 - fração da serragem que atravessa a peneira de 40 mesh e fica retida na peneira de 60 mesh e c) fração 60 - fração da serragem que atravessa a peneira de 60 mesh, que equivale a malha de 0,25 mm de abertura.

A análise química da serragem foi conduzida de maneira a determinar os principais componentes da madeira, ou seja, os polissacarídeos

(holocelulose) e lignina, além dos extrativos solúveis em solventes orgânicos e em água e as cinzas.

As análises químicas envolveram a determinação da:

a) Solubilidade da madeira em álcool-tolueno: este método tem por objetivo a determinação de extrativos solúveis em solventes orgânicos. O método seguiu a norma TAPPI T6m-59 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry).

A solução de álcool-tolueno é preparada na proporção de um volume de álcool etílico 95% com dois volumes de tolueno. A extração é feita no aparelho soxhlet (FIGURA 8) com 200 ml da solução durante 8h. A fração dos extrativos da madeira solúvel em álcool-tolueno é representada por resinas, óleos, ceras e graxas. A solubilidade em álcool-tolueno é expressa em porcentagem.

FIGURA 8 – APARELHO DE EXTRAÇÃO TIPO SOXHLET USADO NA DETERMINAÇÃO DE EXTRATIVOS DA MADEIRA



b) Solubilidade da madeira em água: este método tem por objetivo a determinação de extrativos solúveis em água fria e água quente. Os principais componentes da fração solúvel em água, consistem em

carboidratos, proteínas e sais inorgânicos. Esse método seguiu a norma TAPPI T1m-59.

A solubilidade em água fria é feita colocando-se a quantidade equivalente a  $2,0 \pm 0,1$ g absolutamente seco da madeira em um copo Becker e adicionar 300 ml de água destilada. O material é mantido por 48h em temperatura ambiente, sendo agitado com frequência. Transferir o material para um cadinho filtrante previamente tarado. Lavar a serragem, com sucção, usando água destilada. Secar em estufa a  $105^{\circ} \pm 0,1$ C até peso constante.

Para a solubilidade em água quente, o equivalente a  $2,0 \pm 0,1$ g absolutamente seco da a madeira é colocada em um erlenmeyer com 100 ml de água destilada. O erlenmeyer deve ser colocado em banho-maria com água em ebulição e mantido por 3h. Lavar a serragem, com sucção, usando água destilada. Secar em estufa a  $105^{\circ} \pm 0,1$ C até peso constante. Os resultados são expressos em porcentagem.

c) Solubilidade da madeira em hidróxido de sódio a 1%: este método geralmente é usado para a determinação do grau de ataque da madeira por fungos ou outros agentes de deterioração. O método seguiu as normas TAPPI T4m-59.

A solubilidade em hidróxido de sódio (NaOH) é feita colocando-se equivalente a  $2,0 \pm 0,1$ g absolutamente seco de serragem em um copo Becker com 100 ml da solução de NaOH. O material é mantido por 1h em banho-maria. Depois o material é filtrado e lavado por sucção com ácido acético a 10% e água quente. A secagem é feita em estufa até peso constante.

d) Teor de lignina na madeira: os carboidratos da madeira são hidrolisados por ácido sulfúrico a 72% e a lignina insolúvel no ácido é filtrada, depois seca e pesada. Esse método seguiu a norma TAPPI T222.

Inicialmente as amostras são colocadas em um extrator soxhlet com álcool etanol 95% por 4h. O material é transferido para um Becker com 400 ml de água quente e mantido em banho-maria por 3h. Depois das

extrações preliminares é feita a secagem do material em temperatura ambiente. A seguir o material é colocado em um Becker e adicionado 15 ml de ácido sulfúrico 72%, mantendo por 2h e agitando com frequência. Depois o material é transferido para um erlenmeyer, são adicionados 300 ml de água e completado o volume até 575 ml com ácido sulfúrico a 3% de concentração. A solução é fervida por 4h em banho-maria, usando o condensador de refluxo para manter o volume. Após as 4h, a lignina pode ser lavada, filtrada e seca em estufa até peso constante.

e) Dos extrativos totais: Um procedimento padronizado que é utilizado freqüentemente para a preparação da madeira livre de extrativos, é uma extração com álcool-benzeno (1 : 2) por 4 horas, seguido por extração com álcool 95% por 4 horas em extrator soxhlet, e uma extração final com água quente para remover os resíduos dos solventes.

f) Cinzas na madeira: a determinação do percentual de cinzas na madeira seguiu a norma TAPPI T211. A porção inorgânica da madeira é analisada como cinza por incineração do material orgânico madeira a 600~850° C.

Uma amostra de  $\pm 5$  g de serragem, devidamente seca em estufa, é colocada em um cadinho de porcelana (previamente incinerado e tarado). O cadinho é colocado na mufla a  $525 \pm 25^\circ$  C por um período de três horas ou mais para queimar todo o carbono. Retirar o material da mufla e deixar esfriar num dessecador por uma hora, pesar e calcular a porcentagem baseada no peso seco da amostra.

g) Holocelulose: o teor de holocelulose foi obtido pela diferença entre o peso inicial da amostra menos o teor de lignina e o teor de extrativos calculados.

Embora a densidade da madeira, na forma sólida (tora, tábuas, viga, etc.) seja conhecida, é importante também saber a quantidade de madeira existente num determinado volume de serragem. Segundo KOLLMANN e

CÔTÉ (1984) é essencial, para a indústria, ter um conhecimento do peso médio por unidade de volume para os diferentes tipos de resíduos da madeira.

A determinação da densidade desses materiais (pó-de-lixo e serragem) foi baseada nas normas SCAN-CN 46 : 92 (Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee) e B9 da TMH1 (Standard Methods of Testing Road Construction Materials). A densidade foi obtida através da relação peso/volume utilizando-se um copo Becker (1000 ml). Os materiais coletados na indústria (pó-de-lixo e serragem) e secos em estufa foram transferidos, separadamente, para um copo Becker até completar o volume de 1000 ml (sem nenhum tipo de compactação) e depois pesado. Excluindo-se o peso do Becker, foram obtidos os pesos dos materiais.

Para determinação do teor de umidade, foram retiradas amostras dos resíduos (pó-de-lixo e serragem) coletados na indústria. De cada material foram feitas três repetições de 100 ml (copo Becker). Os materiais foram devidamente identificados e pesados (descontando-se o peso do Becker). Depois o material foi colocado em estufa a  $105 \pm 3^{\circ}$  C até atingir um peso constante.

### 4.2.3 Compósitos

A extrusão foi feita na Escola Tupy, localizada no município de Curitiba-PR.

Para a produção dos compósitos plástico-madeira foi utilizada uma extrusora monorroscas da marca Rasen, rosca (ou parafuso) com 60 mm de diâmetro, geometria da rosca para PVC, relação L/D (comprimento/diâmetro) de 28, com cinco zonas de aquecimento, sem sistema de degasagem (FIGURA 9).

FIGURA 9 - EXTRUSORA MONORROSCA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA



Buscou-se trabalhar com as menores temperaturas possíveis para evitar uma possível degradação da madeira. O ajuste das temperaturas nas cinco zonas de aquecimento ficou entre 130° C (zonas 1 e 2); 140° C (zona 3); 150° C (zona 5) e 160° C (na matriz).

A temperatura da água para resfriamento do extrudado foi de 20º C.

Na verdade, a extrusora utilizada pertencia a uma linha preparada para a produção de tubos. Outros equipamentos existentes na linha eram: a caixa calibradora para tubos, com sistema à vácuo; tanque de água para resfriamento dos tubos; puxador com controlador de velocidade e sistema de corte automático dos tubos.

A matriz ou cabeçote de saída usadas na produção dos compósitos plástico-madeira foi uma matriz para tubos de 20 mm de diâmetro.

Como a matriz utilizada na produção dos compósitos era para tubos, foram utilizados um moinho de facas (FIGURA 10) para picar o material extrusado e ar comprimido para fazer a limpeza das facas.

O compósito granulado e úmido foi levado para secagem na UFPR. A secagem do material foi feita no mesmo secador utilizado para secagem dos resíduos da madeira.

FIGURA 10 - MOINHO DE FACAS



Após a secagem dos granulados de compósitos plástico-madeira, foi feita a injeção dos corpos de prova. Os corpos de prova usados nos ensaios de tração e impacto foram produzidos pelo processo de moldagem por injeção no laboratório da Escola Tupy. Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada uma injetora horizontal da marca Tigre, modelo Bathenffeld (FIGURA 11).

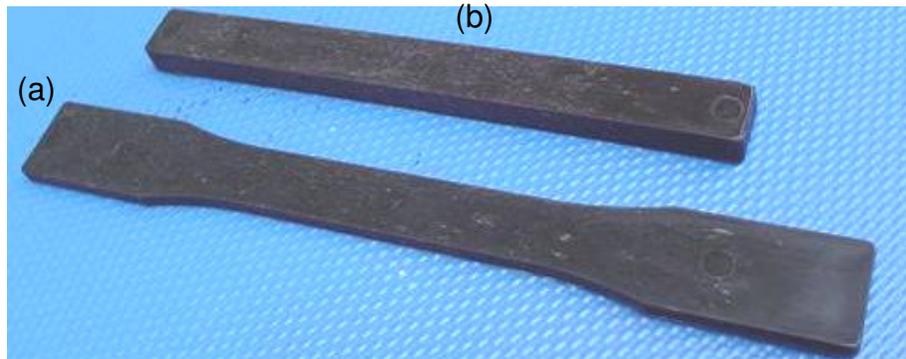
FIGURA 11 – INJETORA HORIZONTAL UTILIZADA NA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA



Para ajustar os parâmetros da injetora para trabalhar com os compósitos plástico-madeira, foram adotados os mesmos parâmetros utilizados para injetar o PP puro. Assim sendo, o tempo do ciclo de injeção, que é o período de tempo que compreende a própria injeção mais os tempos de recalque, de recuo da rosca, tempo de abertura do molde, de ejeção e de fechamento completo, foi de 20 s. O conjunto de temperaturas variou entre 150° C (para as zonas 1; 2 e 3) e 160° C (no bico injetor).

A FIGURA 12 (a) mostra um corpo de prova do tipo M-III (ASTM-D638M) para ensaios de tração, e (b) mostra um corpo de prova do tipo Charpy sem entalhe (ASTM-D256) para ensaios de impacto.

FIGURA 12 – CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO E IMPACTO



Para os testes de impacto foi utilizado um equipamento de pêndulo marca MICROTEST com martelo de 4 J (FIGURA 13). Os ensaios de impacto seguiram a norma ASTM D256. Foi adotado o método Charpy para corpos de prova sem entalhe. Foram ensaiados dez corpos de prova de cada produto. Os testes de impacto foram realizados no laboratório da Escola Tupy.

FIGURA 13 – EQUIPAMENTO PARA TESTE DE IMPACTO



Os ensaios de tração foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR.

Para os ensaios de tração foi utilizada uma máquina universal de ensaio EMIC-10000 (FIGURA 14). Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D638 (American Society for Testing and Materials). Foi adotada uma força de 10 kN, velocidade de 5 mm/min e também foi utilizado o extensômetro. Foram testados dez corpos de prova de cada material.

FIGURA 14 – MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO EMIC



As análises termogravimétricas (TGA) para caracterização do material foram realizadas nos laboratórios da Indústria Automobilística Audi no município de São José dos Pinhais-PR.

Para os testes de TGA foram retiradas amostras ( $\pm 10$ g) dos corpos de prova dos compósitos 10S (10% de serragem); 20S (20% de serragem); 30S (30% de serragem); 10P (10% de pó-de-lixia); 20P (20% de pó-de-lixia); 30P (30% de pó-de-lixia) além do PP (100% de polipropileno). A temperatura

inicial dos ensaios foi de 27° C. A taxa de aquecimento foi de 10° C/min. O tempo de duração de cada ensaio foi de 30 min.

As propriedades físicas dos compósitos foram avaliadas nos ensaios para a determinação da densidade, da estabilidade dimensional (inchamento), da capacidade de absorção de água em 24h de imersão e da capacidade de absorção máxima de água. Os ensaios foram conduzidos no laboratório de Química da Engenharia Industrial Madeireira da Unesp em Itapeva-SP.

Os compósitos plástico-madeira são materiais higroscópicos, ou seja, eles podem ganhar e reter a umidade ou perder umidade. Eles expandem com a absorção de água e as dimensões tornam-se menores com a eliminação da umidade.

Os testes para a determinação da absorção de água e inchamento dos compósitos foram realizados com base na norma ASTM-D570-95.

Inicialmente os corpos de prova ficaram expostos a uma temperatura média de 23° C e umidade relativa de 65% até massa constante. Depois os corpos de prova de cada produto foram identificados, pesados e levados à estufa ( $105 \pm 3^\circ \text{C}$ ) até peso constante. Foi anotado o peso de cada amostra, para determinação da umidade, e também a espessura inicial, para verificar o inchamento.

Os corpos de prova foram imersos em água ( $20 \pm 1^\circ \text{C}$ ). Foram anotados os pesos de cada corpo de prova após 24h de imersão. Depois com intervalos de sete dias foi anotado o peso de cada corpo de prova até a sua estabilização (peso constante), quando foi anotada também a espessura final obtendo-se o inchamento máximo.

Os testes para a determinação da densidade relativa dos compósitos plástico-madeira foram realizados com base na norma ASTM D 792-91.

Inicialmente os corpos de prova foram pesados. Depois foi pesada uma proveta de 50 ml. Com a proveta sobre a balança foi introduzido o corpo de prova na proveta. Nesse processo foi utilizado um arame fino para manter o corpo de prova totalmente submerso na água até que fosse completado o

volume até 50 ml com água a  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  e anotado o peso total (= peso da proveta mais peso da amostra mais o peso da água).

A partir do peso total foram subtraídos o peso da proveta e o peso da amostra, restando o peso da água. Considerando que a densidade da água é igual a um, o peso em gramas é equivalente ao volume em mililitros. Assim sendo, a diferença para completar 50 ml corresponde ao volume ocupado pela amostra. A densidade da amostra foi determinada pela relação entre o peso inicial da amostra e o seu correspondente volume encontrado.

Para a caracterização morfológica dos compósitos plástico-madeira também foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os ensaios foram realizados no Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR, usando o equipamento JEOL – JSM 6360LV, com capacidade de aumento máximo de 150 mil vezes (FIGURA 15) e a voltagem adotada foi de 15 kV.

FIGURA 15- MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA



Para a caracterização morfológica dos compósitos através da Microscopia Eletrônica de Varredura, foi analisada a superfície de fratura de alguns corpos de prova submetidos ao ensaio de tração. Após o rompimento sofrido no ensaio de tração, as amostras foram cortadas e devidamente preparadas para as análises na MEV.

A preparação das amostras para a Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada no laboratório de Física da UFPR (corte dos corpos de prova) e no laboratório do Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR (fixação das amostras). Após serem fixadas nas bases, todas as amostras foram submetidas a uma cobertura com ouro.

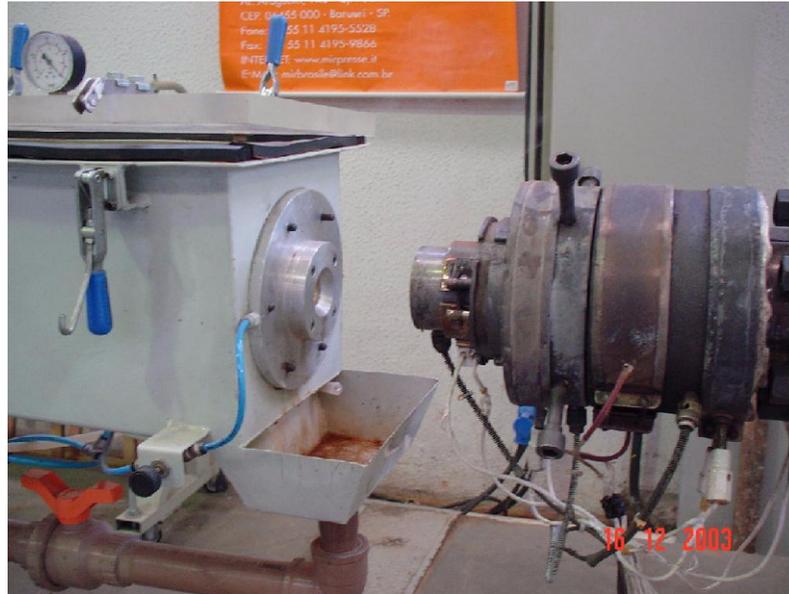
#### 4.2.4 Moldagem de Compósitos

Os compósitos plástico-madeira produzidos nesse estudo foram testados na fabricação de alguns produtos para uso comercial. Foram escolhidos produtos produzidos pelo processo de injeção e pelo processo de extrusão.

O primeiro produto a ser testado foi a produção de tubos a partir de compósitos plástico-madeira pelo processo de extrusão. Os testes foram realizados no Laboratório da Escola Tupy.

Foi utilizada a mesma extrusora empregada na produção dos compósitos plástico-madeira, sendo incluído na linha, o calibrador para tubos com sistema de vácuo e refrigeração a água e o sistema de tração para tubos com controle de velocidade e pressão (FIGURA 16).

FIGURA 16 – MATRIZ PARA TUBOS COM CAIXA CALIBRADORA COM SISTEMA DE VÁCUO



A fabricação dos produtos pelo processo de injeção foi conduzida na Indústria Tanatai Ltda, localizada no município de Pinhais-PR. A indústria produz vasos para flores e utiliza como matéria-prima o polipropileno reciclado. Para a produção dos vasos tendo o compósito plástico-madeira como matéria-prima, foi utilizada uma injetora horizontal normalmente empregada na linha de produção da fábrica.

Pelo processo de injeção, também foram produzidas réguas escolares a partir dos compósitos plástico-madeira. Esses produtos foram injetados em uma injetora Sandretto 65micro, do laboratório do Departamento de Recursos Naturais da Unesp de Botucatu-SP.

A fabricação dos produtos pelo processo de extrusão também foi realizada no laboratório de polímeros do Senai “Mário Amato”, localizado no município de São Bernardo do Campo-SP. O produto escolhido foi uma canaleta protetora para fios elétricos. A escolha feita foi em função da matriz disponível no laboratório do Senai.

Para a produção da canaleta a partir dos compósitos foi utilizada uma extrusora monorroscas de 45 mm de diâmetro, rosca tipo universal, relação L/D (comprimento/diâmetro) de 25, com cinco zonas de aquecimento, sem sistema de degasagem, saída com perfil para canaleta (FIGURA 17).

O ajuste do conjunto de aquecimento ficou entre 160° C (zonas 1; 2 e 3); 170° C (zona 4) e 180° C (matriz). O calibrador do perfil tinha um sistema de vácuo para formação da canaleta e um sistema de refrigeração forçada com água gelada, mantendo a temperatura do calibrador à 3° C. Esse sistema de refrigeração permite o resfriamento do material, sem a necessidade do contato direto com a água.

A linha de produção tinha ainda um sistema para tracionar os perfis com controle de velocidade e pressão, além do sistema automático de corte dos perfis.

FIGURA 17 – EXTRUSORA MONORROSCA COM CALIBRADOR À VÁCUO E SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM ÁGUA GELADA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE PERFIS

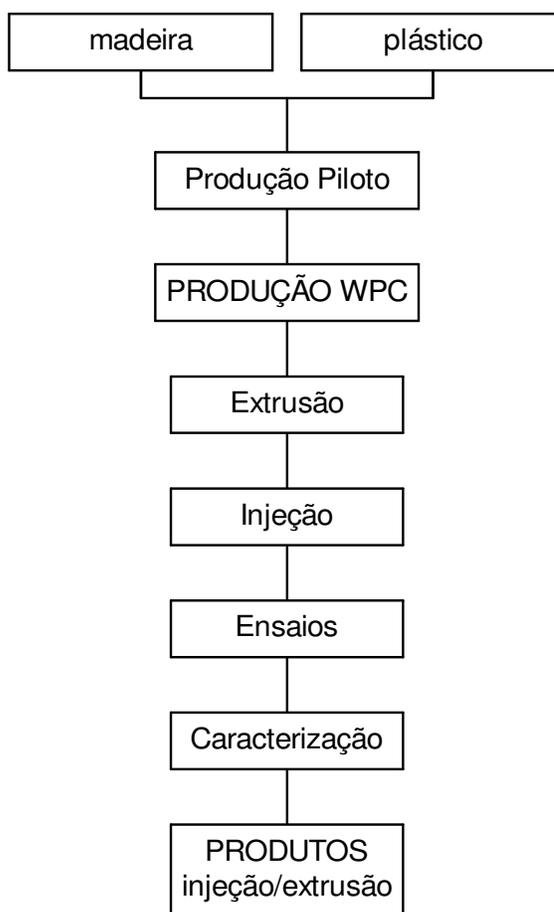


### 4.3 METODOLOGIA

Esse estudo foi dividido em duas etapas. Inicialmente foram feitos os testes preliminares denominados de “produção piloto” para obtenção de parâmetros para a produção dos compósitos plástico-madeira.

A seqüência das principais etapas desenvolvidas neste estudo está sintetizada na FIGURA 18.

FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS



#### 4.3.1 Produção Piloto

Inicialmente foi realizada uma produção piloto para verificar a viabilidade da produção de compósitos plástico-madeira em uma extrusora monorrosca e observar o comportamento da madeira dentro do processo.

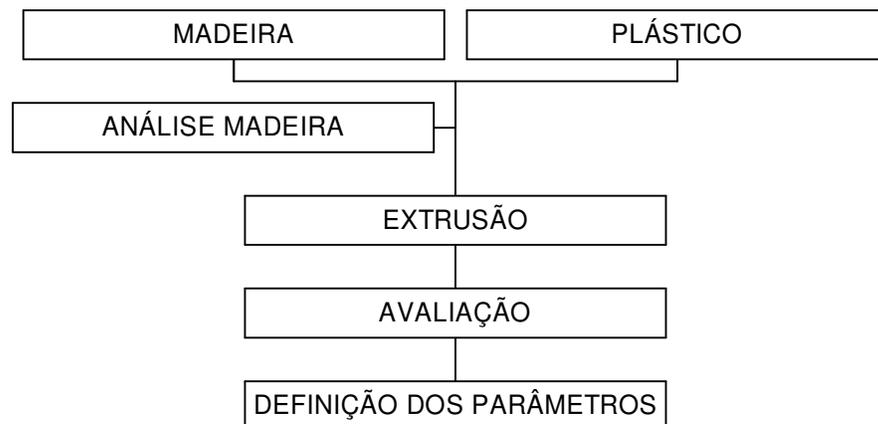
Houve a necessidade dos testes preliminares porque, embora a produção de compósitos seja uma realidade em outros países, as espécies de madeira utilizadas nesse estudo são diferentes. Assim sendo, não havia como saber qual o comportamento que essas madeiras teriam no interior de uma extrusora.

Outro fator importante a ser verificado nos testes preliminares foi a possibilidade de uso de uma extrusora monorrosca, uma vez que, para a produção de compósitos plástico-madeira, normalmente, é recomendado o uso de extrusoras dupla rosca.

Assim sendo, embora haja a recomendação para o uso da extrusora de dupla rosca, a extrusora utilizada neste estudo foi do tipo monorrosca, por ser o equipamento mais comumente encontrado nas indústrias de plástico.

A seqüência das atividades desenvolvidas nos testes preliminares está sintetizada na FIGURA 19.

FIGURA 19 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NA PRODUÇÃO PILOTO



O plástico utilizado para a produção piloto dos compósitos plástico-madeira foi o mesmo polietileno de baixa densidade (PEBD) reciclado, normalmente utilizado pela indústria na linha de produção.

A relação completa dos materiais utilizados na produção piloto pode ser vista na TABELA 1.

O material foi fornecido pela Indústria Roguiplast. A empresa trabalha com reciclagem e produção de tubos e mangueiras de polietileno de baixa densidade.

Para o plástico também foram coletadas amostras para determinar o teor de umidade (antes da mistura com a madeira), uma vez que há a inclusão de água no processo de reciclagem do PEBD (após a separação, o material plástico é levado ao aglutinador onde recebe um pequeno volume de água para a formação dos plásticos aglutinados).

TABELA 1 – MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO PILOTO

Produto	Quantidade (kg)	Descrição
Polietileno	300	PEBD reciclado
Serragem	30	Resíduo da esquadrejadeira
Pó-de-lixia	30	Resíduo da calibradora e lixadeira

Os resíduos de madeira (serragem e pó-de-lixia), usados nesse estudo, são oriundos de um processo de produção de chapas de compensado. Portanto, já passaram por secadores, prensagem à quente e apresentam um teor de umidade menor que 8%, que pode ser considerado um valor baixo para a madeira.

Assim sendo, na primeira etapa, os resíduos foram utilizados na produção dos compósitos sem nenhum processo de secagem.

Para a produção dos compósitos plástico-madeira, nessa produção piloto, foram programadas quatro formulações para cada um dos dois tipos de resíduo (pó-de-lixia e serragem), resultando num total de oito formulações (ver TABELA 2).

TABELA 2 – FORMULAÇÕES PROGRAMADAS PARA A PRODUÇÃO PILOTO

TRATAMENTO	PRODUTO	DESCRIÇÃO
1	10SPE	10% de serragem + 90%PEBD
2	20SPE	20% de serragem + 80%PEBD
3	40SPE	40% de serragem + 60%PEBD
4	50SPE	50% de serragem + 50%PEBD
5	10PPE	10% de pó-de-lixo + 90%PEBD
6	20PPE	20% de pó-de-lixo + 80%PEBD
7	40PPE	40% de pó-de-lixo + 60%PEBD
8	50PPE	50% de pó-de-lixo + 50%PEBD

NOTA: .PEBD = polietileno de baixa densidade

Cada formulação (madeira + PEBD) foi preparada e misturada previamente (em lotes de 10 kg) para, então, ser colocada na extrusora. Essa pré-mistura foi feita utilizando o próprio aglutinador.

O ajuste da extrusora para processar os compósitos plástico-madeira foi feito nas mesmas condições utilizadas pela empresa para processar o PEBD (polietileno de baixa densidade) sem nenhum tipo de mistura (100% plástico).

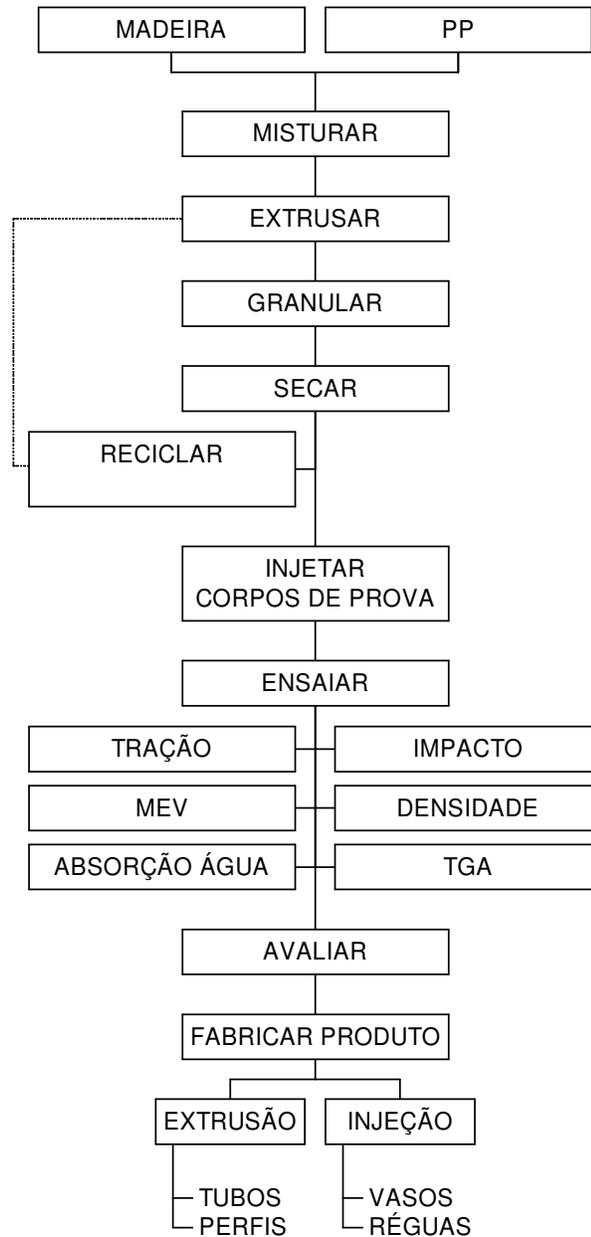
O objetivo da produção piloto foi verificar a viabilidade da utilização da extrusora monorroscas na produção de compósitos plástico-madeira.

Com base nesses conhecimentos preliminares, foi definido o programa para a produção do compósito plástico-madeira para as duas granulometrias da madeira (pó-de-lixo e serragem), combinadas com diversos percentuais da madeira e compatibilizantes na composição.

#### 4.3.2 Produção dos Compósitos Plástico-Madeira

A seqüência das principais etapas desenvolvidas para a produção dos compósitos plástico-madeira deste estudo está sintetizada na FIGURA 20.

FIGURA 20 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NA PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA



Embora nos testes preliminares tenha sido utilizado o plástico reciclado, para a produção dos compósitos plástico-madeira foi decidido empregar um polímero virgem, haja vista que o material reciclado pode

apresentar contaminação que venha a interferir nos ensaios, dificultando a análise dos resultados. Com base na revisão bibliográfica, optou-se trabalhar com o polipropileno adicionando um compatibilizante para melhorar as propriedades dos compósitos. Os materiais utilizados foram o polipropileno virgem, os resíduos de madeira e compatibilizante.

A madeira utilizada na produção dos compósitos plástico-madeira foi a mesma usada na produção piloto. Como os resíduos de madeira apresentaram problemas de umidade nos testes preliminares, todos os resíduos da madeira passaram por um processo de secagem em estufa a  $105 \pm 3^\circ \text{C}$  até peso constante.

Os resíduos da madeira, o polipropileno e o anidrido maleico utilizados nesse estudo foram fornecidos pela Indústria de Compensados Triângulo Ltda. O peróxido de dibenzoila foi fornecido pela distribuidora Diprofiber Ltda. de Curitiba-PR. A relação completa dos materiais utilizados para a produção do compósito plástico-madeira pode ser vista na TABELA 3.

TABELA 3 – MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA

Produto	Quantidade (kg)	Descrição
Polipropileno (PP)	250	Homopolímero (POLIBRASIL - HP501K), fluidez de 3,5 g/10 min
Serragem	30	Resíduo da esquadrejadeira
Pó-de-lixia	30	Resíduo da calibradora e lixadeira
Anidrido maleico	3	Em pó (pureza = 99%)
Peróxido de dibenzoila	1	Em pó (concentração = 75%)

A descrição completa das características técnicas do polipropileno utilizado nesse estudo estão na folha de dados do produto no ANEXO 2.

O estudo para verificar a influência da quantidade de madeira, da granulometria e de compatibilizante nas propriedades do compósito plástico-madeira foi feito através de um planejamento de experimentos fatorial.

A definição do programa para a produção dos compósitos plástico-madeira envolveu duas granulometrias da madeira (pó-de-lixia e serragem), dois níveis de quantidade de madeira e quatro níveis de compatibilizante, resultando em 16 formulações. Incluindo a produção do PP puro, a programação da produção resultou num total de 17 formulações (TABELA 4).

TABELA 4 – FORMULAÇÕES PROGRAMADAS PARA A PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA

PRODUTO	DESCRIÇÃO
1	10S 10% de serragem + 90%PP
2	30S 30% de serragem + 70%PP
3	10S1% 10% de serragem c/ 1% anidrido maleico + 0,25% peróxido de dibenzoila + 88,75%PP
4	30S1% 30% de serragem c/ 1% anidrido maleico + 0,25% peróxido de dibenzoila + 68,75%PP
5	10S2% 10% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,50% peróxido de dibenzoila + 87,50%PP
6	30S2% 30% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,50% peróxido de dibenzoila + 67,50%PP
7	10S3% 10% de serragem c/ 3% anidrido maleico + 0,75% peróxido de dibenzoila + 86,25%PP
8	30S3% 30% de serragem c/ 3% anidrido maleico + 0,75% peróxido de dibenzoila + 66,25%PP
9	10P 10% de pó + 90%PP
10	30P 30% de pó + 70%PP
11	10P1% 10% de pó c/ 1% de anidrido maleico + 0,25% de peróxido de dibenzoila + 88,75%PP
12	30P1% 30% de pó c/ 1% de anidrido maleico + 0,25% de peróxido de dibenzoila + 68,75%PP
13	10P2% 10% de pó c/ 2% de anidrido maleico + 0,50% de peróxido de dibenzoila + 87,50%PP
14	30P2% 30% de pó c/ 2% de anidrido maleico + 0,50% de peróxido de dibenzoila + 67,50%PP
15	10P3% 10% de pó c/ 3% de anidrido maleico + 0,75% de peróxido de dibenzoila + 86,25%PP
16	30P3% 30% de pó c/ 3% de anidrido maleico + 0,75% de peróxido de dibenzoila + 66,25%PP
17	100%PP 100% polipropileno virgem

NOTA: .S = serragem

.P = pó-de-lixia

.1%; 2% e 3% = conteúdo de anidrido maleico

.a descrição completa de todos os tratamentos está no ANEXO 1.

A preparação das formulações dos compósitos foi realizada no laboratório de Secagem da Madeira do DETF do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPR. A preparação consistiu na pesagem e pré-mistura dos componentes.

O volume a ser preparado para cada lote foi determinado em função das características da extrusora (diâmetro da rosca e tamanho do funil), da quantidade de granulado necessária para alimentar a injetora e da quantidade

de produto final desejado (corpos de prova e outros possíveis produtos). Considerando ainda as perdas no início e final de cada processo, foi estabelecida a quantidade de 10 kg para cada formulação.

O PP e a madeira foram pesados em balança com precisão de 0,05 kg. Para pesar o anidrido maleico e o peróxido de dibenzoila foi utilizada uma balança eletrônica com precisão de 0,1 mg.

Todos os componentes de cada formulação foram colocados em um saco plástico (capacidade de 100 litros) e misturados manualmente durante 15 min.

Cada formulação foi preparada em um saco plástico separado, misturada previamente e etiquetada para, então, ser colocada na extrusora. O ajuste da extrusora para processar o compósito plástico-madeira foi feito nas mesmas condições utilizadas pelo laboratório para processar o polipropileno (PP puro).

Após a extrusão, o material foi picado num moinho de facas e levado para secagem em estufa a  $105 \pm 3^\circ \text{C}$  até peso constante. A secagem dos compósitos (granulados) foi feita no laboratório de Polpa e Papel do DETF do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPR.

#### 4.3.3 Voláteis na Madeira

Um experimento foi montado para verificar a interferência dos materiais voláteis da madeira no processo extrusão.

Amostras da serragem úmida e seca em estufa (0%) foram pesadas e colocadas em cadinho e levadas à mufla com temperatura controlada em  $170^\circ \text{C}$ .

As amostras foram retiradas após intervalos de 30s, 60s, 90s e 120s, colocadas num dessecador e pesadas. O tempo de 120s corresponde ao tempo de residência do material dentro da extrusora.

Esse experimento foi conduzido no laboratório de Energia e Biomassa do DETF do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPR.

#### 4.3.4 Reciclagem

Para se verificar a possibilidade da reciclagem do compósito plástico-madeira, foram realizados processos de reciclagem de quatro formulações com até três passagens pela extrusora, resultando num total de doze produtos (TABELA 5).

TABELA 5 – PROGRAMAÇÃO PARA PROCESSOS DE RECICLAGEM, COM UM TOTAL DE DOZE FORMULAÇÕES DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA

PRODUTO		DESCRIÇÃO
1	10S	10% de serragem + 90%PP
2	30S	30% de serragem + 70%PP
3	10S2%	10% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 87,5%PP
4	30S2%	30% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 67,5%PP
5	10S 2X	10% de serragem + 90%PP (2 extrusões)
6	30S 2X	30% de serragem + 70%PP (2 extrusões)
7	10S2% 2X	10% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 87,5%PP (2 extrusões)
8	30S2% 2X	30% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 67,5%PP (2 extrusões)
9	10S 3X	10% de serragem + 90%PP (3 extrusões)
10	30S 3X	30% de serragem + 70%PP (3 extrusões)
11	10S2% 3X	10% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 87,5%PP (3 extrusões)
12	30S2% 3X	30% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 67,5%PP (3 extrusões)

Onde: .S = serragem

.2% = conteúdo de anidrido maleico

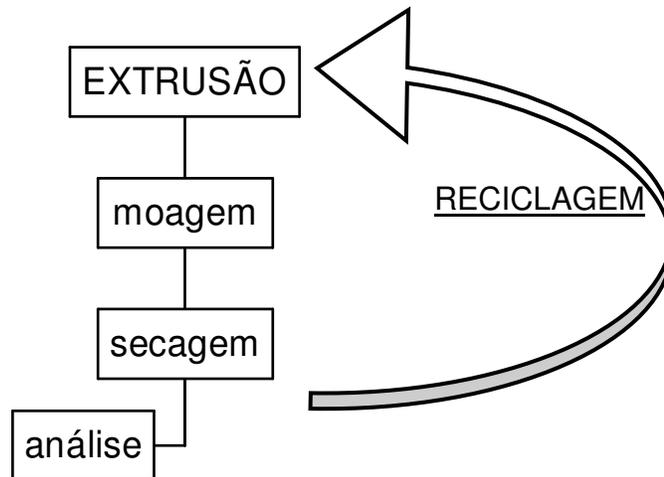
.2X = duas extrusões (reciclagem)

.3X = três extrusões (dupla reciclagem)

.a descrição completa de todos os produtos está no ANEXO 1.

O processo de reciclagem dos compósitos plástico-madeira pode ser visto na (FIGURA 21).

FIGURA 21 - PROCESSO DE RECICLAGEM



Cada uma das quatro formulações de compósitos foi extrudada (1ª extrusão) e depois moída (moinho de facas) resultando nos granulados de compósitos plástico-madeira. Em seguida foram levados para secagem em estufa para então retornar ao processo de extrusão (reciclagem). Cada produto passou três vezes pela extrusora, ou seja, uma primeira extrusão para a formação dos compósitos, e depois sofreu um processo duplo de reciclagem

Após cada etapa da extrusão, foi retirada uma amostra do material para a injeção dos corpos de prova, antes da próxima extrusão.

#### 4.3.5 Aplicação dos Compósitos Plástico-Madeira

A última etapa dos testes consistiu na aplicação dos compósitos plástico-madeira na fabricação de um produto.

Os compósitos plástico-madeira produzidos nesse estudo foram testados como matéria-prima na fabricação de vasos para orquídeas e régua escolares obtidos pelo processo de injeção e também na fabricação de tubos e perfis onde foi utilizado o processo de extrusão.

A escolha desses produtos foi em função da disponibilidade da matriz nos respectivos locais de produção.

A produção dos tubos foi testada durante o processo de produção dos compósitos plástico-madeira. Foram produzidos tubos com as formulações 10P (10% de pó-de-lixo + 90%PP) e 10S (10% de serragem + 90%PP).

Para a produção dos vasos foram escolhidos três produtos (formulações) procurando contemplar diferentes granulometrias, percentual de madeira e presença ou não de aditivos. Foram produzidos vasos com as composições 10P2% (10% de pó-de-lixo + 2% anidrido maleico + 0,5% de peróxido de dibenzoila + 87,5%PP); 20P (20% de pó-de-lixo + 80%PP) e o material reciclado 30S3X (30% de serragem + 70%PP + 3 extrusões).

As régua escolares foram produzidas pelo processo de injeção com o compósito 30S1% (30% de serragem + 1% de anidrido maleico + 0,25% de peróxido de dibenzoila + 68,75%PP).

Para a produção de perfis foram testadas três formulações: 10PP (10% de pó-de-lixo mais 90% de PEBD); 20P (20% de pó-de-lixo + 80% de PP) e o material reciclado 30S3X (30% de serragem + 3 extrusões).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 PRODUÇÃO PILOTO

Os testes preliminares mostraram que é possível utilizar a extrusora monorroscas para a produção de compósito plástico-madeira. Permitiram ainda, conhecer algumas características importantes que influenciam o processo de produção do compósito plástico-madeira como o teor de umidade da mistura, temperatura de processamento e o percentual de madeira na mistura entre outras.

Foi observado que a umidade é um fator importante na produção de compósitos plástico-madeira. A produção dos compósitos sem uma pré-secagem da madeira limitou a produção a formulações com um conteúdo máximo de 40% de madeira.

Essa produção piloto também foi importante para a escolha do tipo de polímero a ser utilizado, bem como para definir as formulações para a produção do compósito plástico-madeira.

Considerando que a indústria utiliza o PEBD - polietileno de baixa densidade (sem a madeira) nos processos de reciclagem sem problemas na sua produção, as dificuldades observadas durante o processamento dos compósitos plástico-madeira podem ser atribuídas à adição da madeira.

Mesmo utilizando os equipamentos convencionais existentes numa indústria recicladora de plástico, sem modificações, a produção de compósitos plástico-madeira foi possível (FIGURA 22).

Em todos os processos de produção do compósito plástico-madeira houve a liberação de um odor característico diferente do cheiro verificado durante o processamento do polietileno puro (100% PEBD). Quanto maior o percentual de madeira na formulação dos compósitos processados, mais intenso foi percebido o odor, lembrando o cheiro de madeira queimada.

FIGURA 22 – COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS A PARTIR DO PEBD RECICLADO



Outra característica observada foi a geração de gases em todos os processos. Durante o processo de fusão do plástico (135~150° C), a umidade contida na mistura transforma-se em vapor. Esses gases são eliminados juntamente com o material. Quanto maior a quantidade de madeira nas formulações, maior o teor de umidade na mistura (TABELA 6). A produção do compósito plástico-madeira foi afetada pelo volume de gases produzidos no interior da extrusora. Dependendo da quantidade desses gases gerados, quando eram eliminados na matriz, causavam o rompimento do extrudado, interrompendo a produção dos compósitos.

As duas formulações com 10% apresentaram um teor de umidade da mistura de 0,8% e 1,0% para o pó e para a serragem respectivamente. Esses índices estão dentro dos limites citados por SCHUT (1999) e CLEMONS (2002) (item 5.2.3). A produção de gases pôde ser observada, mas não chegou a interferir negativamente na produção.

As formulações com 20% de madeira apresentaram um conteúdo de umidade de 1,3% e 1,7% para o pó-de-lixia e para a serragem respectivamente.

Embora esses índices estivessem acima do teor de umidade recomendado, a produção do compósito, com o pó-de-lixia não foi tão afetada. Já a produção do compósito usando a serragem (1,7% de umidade na mistura) sofreu interrupções durante o processo de extrusão.

As formulações com 40% de madeira resultaram num teor de umidade da mistura de 3,1% para a formulação com a serragem e de 2,3% para a formulação que utilizou o pó-de-lixia. Ambas as formulações com 40% tiveram sua produção prejudicada pela formação de gases. O fluxo dos fios ou espaguetes foi constantemente interrompido para liberação dos gases que era formado no interior da extrusora.

TABELA 6 – CONTEÚDO DE UMIDADE CALCULADO DAS MISTURAS

Formulações (% de madeira)	Teor de umidade (%)	
	Serragem	Pó (lixadeira)
10	1,0	0,8
20	1,7	1,3
40	3,1	2,3
50	3,8	2,8

As duas formulações com 50%, tanto para o pó-de-lixia quanto a serragem, não foram produzidas, haja vista que as formulações com 40% já apresentaram restrições (geração de gases e interrupções na produção) durante seu processamento na extrusora.

Devido as dificuldades observadas durante a extrusão, causada pela umidade, um segundo lote foi preparado, seguindo as mesmas 8 formulações, com os resíduos passando por um processo de secagem em estufa ( $105 \pm 3^\circ \text{C}$ ) até peso constante.

O lote preparado com os resíduos de madeira secos em estufa teve um desempenho semelhante ao primeiro lote (material sem passar pelo secador). A diferença foi uma redução na quantidade de vapor gerado dentro da extrusora, resultando num menor número de interrupções na produção (causado pelo rompimento dos fios na saída da extrusora). Isso demonstra a importância de se eliminar a umidade dos materiais no processo de produção do compósito plástico-madeira.

## 5.2 MADEIRA

### 5.2.1 Granulometria

Na TABELA 7 são apresentados os resultados da análise granulométrica dos materiais utilizados na produção dos compósitos plástico-madeira.

TABELA 7 - RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Peneira (mesh)	% de material retido na peneira	
	Serragem	Pó-de-lixia
20	3	0
40	18	0
60	30	2
100	22	14
Fundo	27	84

Analisando a classificação da madeira com o conjunto de peneiras que foi utilizada no teste, pode-se considerar que a serragem é mais heterogênea, quanto ao tamanho das partículas, do que o pó-de-lixia.

Na FIGURA 23, observa-se que o pó da lixa (b) é um material mais fino e mais uniforme, quando comparado com a serragem (a).

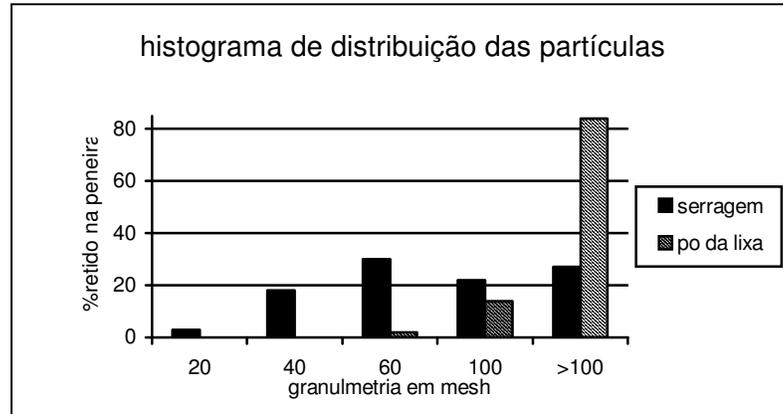
FIGURA 23 – SERRAGEM E PÓ-DE-LIXA UTILIZADOS NAS FORMULAÇÕES DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS



NOTAS: .(a) = serragem  
 .(b) = pó-de-lixia

A serragem apresenta uma granulometria que varia desde 20 mesh até 100 mesh. A granulometria do pó-de-lixia variou de 60 mesh a menor que 100 mesh, sendo que 84% do pó-de-lixia apresentou uma granulometria menor que 100 mesh. A distribuição da granulometria pode ser vista na FIGURA 24.

FIGURA 24 – HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS



### 5.2.2 Densidade

Na TABELA 8 são apresentados os valores de densidade aparente determinadas para os materiais utilizados na produção dos compósitos plástico-madeira.

TABELA 8 - RESULTADOS DOS TESTES DE DENSIDADE APARENTE

	Serragem	Pó-de-lixia
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,25	0,14

Observa-se que o pó-de-lixia, material que teve a granulometria mais fina (menor que 100 mesh), é o material que apresenta a densidade mais baixa. De acordo com a REVISTA DO PLÁSTICO (2002), KOENIG e SYPKENS (2002), a baixa densidade dos resíduos da madeira é um dos fatores para que ocorram inconsistências no produto, como a separação de materiais, acarretando na produção de um compósito plástico-madeira de baixa qualidade.

Na fase de preparação dos compósitos (pesagem e pré-mistura), houve maior dificuldade para se trabalhar com o pó-de-lixia. Por ser um material muito fino e leve, o manuseio requer muito cuidado para evitar que o material se espalhe e contamine toda a área de trabalho.

Devido à sua baixa densidade aparente, as formulações com o pó-de-lixia necessitam de recipientes com maior capacidade de volume para realizar as pré-misturas. Devido a essa restrição e também pela dificuldade em manusear grandes volumes, as formulações com 30% de pó-de-lixia foram divididas em dois lotes de 5 kg.

### 5.2.3 Teor de Umidade

A TABELA 9 apresenta os resultados dos testes de umidade dos materiais antes das pré-misturas. Segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1984), a umidade de equilíbrio de uma determinada espécie de madeira varia de acordo com a umidade relativa do ar e da histerese. Considerando uma umidade relativa do ar entre 60% e 90% e uma temperatura entre 20 e 30° C, pode-se dizer que a umidade de equilíbrio da madeira deve ficar entre 10% e 20%.

TABELA 9 - RESULTADOS DO TESTE DE TEOR DE UMIDADE

	Serragem	Pó-de-lixia	PEBD (granulado)
Teor de umidade	7,4%	5,2%	0,4%

NOTA: PEBD = polietileno de baixa densidade

Assim sendo, o conteúdo de umidade encontrado de 7,4% para a serragem e 5,2% para o pó da lixadeira podem ser considerados baixos. Entretanto, de acordo com SCHUT (1999) e CLEMONS (2002), um teor de umidade acima de 1% pode ser considerado elevado para processamento em extrusoras.

O teor de 0,4% de umidade do PEBD reciclado é devido ao acréscimo de água durante o processo de aglutinação (formação do granulado reciclado). Nesse processo, os plásticos sofrem um grande atrito no interior do aglutinador acarretando na elevação da temperatura e com isso começam a fundir. A água serve para ocasionar o choque térmico para a solidificação do plástico e assim, resultar na formação dos granulados.

#### 5.2.4 Análise Química da Madeira

Os resultados da análise química da madeira estão na TABELA 10:

TABELA 10 - RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA

TIPO DE ANÁLISE	%
Solubilidade em água fria	4,7
Solubilidade em água quente	8,1
Solubilidade em etanol-tolueno	3,4
Solubilidade em NaOH1%	14,3
Cinzas	1,2
Lignina	24,7
Extrativos totais	8,7
Holocelulose (celulose + hemicelulose)	66,6

De acordo com KOLLMANN e CÔTÉ (1984), considerando a composição química da madeira, é necessário enfatizar que a madeira não é um material homogêneo. Dessa forma, a composição química da madeira pode ter uma grande variação mesmo dentro de uma mesma espécie.

Ainda, segundo os mesmos autores, apesar das limitações, é possível fazer algumas generalizações quanto aos principais componentes da madeira. O teor de lignina nas folhosas varia entre 18 e 25%. O conteúdo de celulose varia entre 40 e 44% e a hemicelulose entre 20 e 35%. O teor de cinzas normalmente está entre 0,2 e 0,5% no caso de madeiras de zonas temperadas, mas freqüentemente valores mais altos são verificados em madeiras tropicais. E quanto ao teor e a natureza dos extrativos pode haver uma grande variação.

Os resultados da análise química da madeira mostram que, apesar de haver uma mistura de duas diferentes espécies nos resíduos utilizados, os valores encontrados estão dentro da normalidade.

O teor de extrativos totais (8,7%) pode ser considerado significativo caso todos os extrativos sejam volatilizados durante a extrusão. Entretanto, os resultados do experimento de volatilização indicam que apenas parte dos extrativos é volatilizada durante a extrusão dos compósitos.

TABELA 11 - RESULTADOS DOS TESTES DE VOLATILIZAÇÃO DOS EXTRATIVOS A 170°C

TEMPO (s)	%VOLATILIZADO
30	0,4
60	0,7
90	1,1
120	1,5

Os resultados da TABELA 11 mostram que durante o tempo de residência da madeira dentro da extrusora (120 s), houve uma volatilização de 1,5% do material. Isso mostra que, durante a extrusão dos compósitos com 30% de madeira, um teor de 0,45% são os voláteis eliminados juntamente com outros gases.

O mesmo experimento foi repetido para a serragem “úmida” (7,3%). Os resultados podem ser vistos na TABELA 12:

TABELA 12 - RESULTADOS DA VOLATILIZAÇÃO DA ÁGUA A 170° C

TEMPO (s)	% VOLATILIZADO
30	2,0
60	2,6
90	2,8
120	3,4

Os resultados mostram que em 120 s houve uma volatilização de 3,4% do material. A água da madeira é eliminada com maior facilidade quando comparada com os extrativos. Isso mostra a interferência da umidade da madeira dentro do processo de extrusão do compósito plástico-madeira.

### 5.3 COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA

#### 5.3.1 Extrusão Reativa

A produção prévia do PPMA (PP + anidrido maleico + peróxido) não foi possível de ser realizada, pois a mistura aderiu no funil de alimentação bem como na rosca da extrusora. Assim sendo, optou-se pela extrusão reativa do polipropileno e anidrido maleico/peróxido de dibenzoila na presença das fibras.

A extrusão reativa, juntamente com a madeira, possibilitou a produção do compósito plástico-madeira. Algumas observações puderam ser feitas desde a fase de preparo (pesagem e pré-mistura) até a extrusão:

- o manuseio do compatibilizante (ácido) exigiu o uso de luvas e máscara;
- como a quantidade de compatibilizante que entrou na formulação foi pequena (máximo de 3%), a pré-mistura dos componentes exigiu cuidado para haver uma boa distribuição;
- a pré-mistura deve ser feita no momento da extrusão. A reação pode se iniciar fora da extrusora e, em algumas horas vai formando pequenos aglomerados pastosos que dificultam o manuseio, bem como o escoamento do material;
- em todas as formulações com a presença do compatibilizante, a reação teve início ainda no funil de alimentação. Isto porque o ponto de fusão do anidrido maleico é de 55° C, e a temperatura na boca do funil manteve-se próxima a 100° C. A reação resultou na formação de uma pasta que aderiu nas paredes do funil e dificultou o escoamento do material para dentro da extrusora;

- na extrusão reativa houve a liberação de gases, fazendo se necessário um sistema de degasagem na extrusora, bem como um sistema de exaustão no ambiente de trabalho (FIGURA 25);

FIGURA 25 - LIBERAÇÃO DE GASES NA EXTRUSÃO REATIVA



- a maior dificuldade foi observada na produção do compósito 30P3% (30% de pó-de-lixia mais 3% anidrido) onde o fluxo do material na extrusora foi prejudicado pela formação da pasta de anidrido e pela baixa densidade do pó-de-lixia. O material muito “fofo” não deslizava e ficava aderido na parede do funil, separando-se do polímero (granulado) resultando em um material não homogêneo;
- a produção do PP maleatado foi inviabilizada pela formação da pasta que aderiu tanto no funil como na rosca da extrusora, impedindo o escoamento do produto. A extrusão reativa só foi possível para as formulações com a presença da madeira. De certa forma, a madeira serviu como material isolante, retardando a reação, e diminuindo formação da pasta e permitindo o fluxo do material para dentro do cilindro.

### 5.3.2 Resultados das Análises

As médias dos valores obtidas em cada ensaio estão apresentadas na TABELA 13.

TABELA 13 – MÉDIAS DOS VALORES OBTIDOS EM CADA ENSAIO

Tratamentos	Granulometria	Madeira (%)	Compatibilizante (%)	Tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo (MPa)	Impacto (J/m <sup>2</sup> )
10P	Pó	10	0	24,60	6,7	2515	31
10P1%			1	27,51	7,5	2054	34
10P2%			2	27,53	7,2	2114	33
10P3%			3	27,76	7,6	2065	34
30P		30	0	21,28	3,8	2843	13
30P1%			1	23,14	4,3	3540	10
30P2%			2	25,35	3,7	4848	14
30P3%			3	24,21	3,1	4019	13
10S	Serragem	10	0	24,66	6,9	2381	32
10S1%			1	26,93	6,1	2539	27
10S2%			2	28,00	6,4	2455	32
10S3%			3	28,22	6,1	3636	31
30S		30	0	23,90	3,2	3960	13
30S1%			1	25,00	3,4	5426	20
30S2%			2	26,85	2,9	4424	15
30S3%			3	27,12	2,8	4676	17
100%PP	100% PP	0	0	26,21	10,9	1591	NR

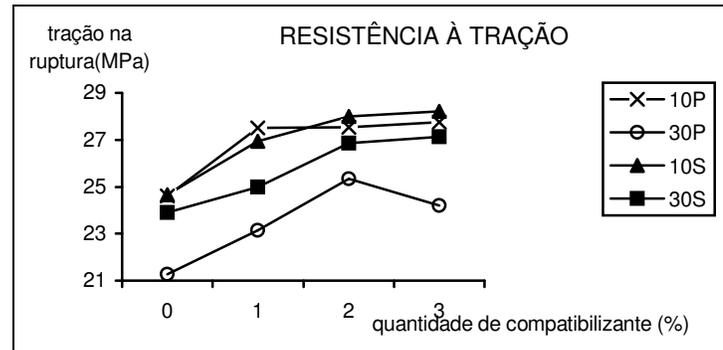
NOTAS: .NR = não rompeu

.a descrição completa de todos os tratamentos está no ANEXO 1.

De acordo com os resultados do ensaio de tração apresentados na TABELA 13, pode se observar que:

- em relação ao PP puro, oito formulações dos compósitos plástico-madeira estão mais resistentes, principalmente as composições com a serragem;
- o compósito 10S3% (10% de serragem mais 3% de compatibilizante) foi o que apresentou a melhor média, sendo 14,4% superior ao compósito sem compatibilizante 10S (10% de serragem mais 0% de compatibilizante);
- em todas as formulações, a inclusão do compatibilizante resultou em um aumento na resistência à tração (FIGURA26 );

FIGURA26 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS



NOTAS: .10P = 10% de pó-de-lixia  
 .30P = 30% de pó-de-lixia  
 .10S = 10% de serragem  
 .30S = 30% de serragem

- em todas as formulações, o aumento do percentual de compatibilizante também resultou em um aumento na resistência à tração. Com exceção do 30P3% (30% de pó mais 3% compatibilizante) onde o maior valor foi encontrado para 2% de compatibilizante;
- a formulação com 10% de pó mais 3% de compatibilizante teve um aumento de 12,9% na resistência à tração em relação ao mesmo produto sem compatibilizante;
- o maior ganho (19,1%) foi observado para 30% de pó mais 2% de compatibilizante em relação à formulação com 0% de compatibilizante.

### 5.3.3 Ensaio de Tração

Os aumentos de resistência à tração, observados nas amostras preparadas com agente compatibilizante indicam uma melhor transferência de tensão da matriz para o reforço lignocelulósico na interface polímero-madeira decorrente de uma provável ocorrência de ancoramento mecânico e interações químicas entre os grupos anidrido e as hidroxilas da celulose.

Para a avaliação do experimento foram feitas as análises estatísticas considerando os ensaios de tração e envolveram as seguintes etapas:

- a) Teste de homogeneidade das variâncias (teste de Bartlett);
- b) Análise da variância;
- c) Teste de comparação de médias (teste de Tukey)

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software estatístico MStat-C e o Excel para tabulação de dados e gráficos.

TABELA 14 – RESUMO DA ANOVA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO

Fonte de variação	Bartlett	F
A x B x C	0,1055	4,93**
A x B	-	140,52**
A x C	-	5,22**
B x C	-	10,33**

NOTAS: A = granulometria

B = % de madeira

C = % de compatibilizante

\*\* = significativo a 1% de probabilidade

O resultado do teste de Bartlett (TABELA 14) mostra que as variâncias podem ser consideradas como homogêneas, portanto, pode-se prosseguir com a análise das variâncias.

Na análise da variância com os tratamentos em arranjo fatorial, duas hipóteses foram testadas:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_{16}$
- $H_1$ : pelo menos uma média é diferente

Os experimentos com arranjos fatoriais dos tratamentos são aqueles onde os efeitos de dois ou mais fatores são investigados ao mesmo tempo.

Nesse estudo três fatores, granulometria (A), % de madeira (B) e % de compatibilizante (C) foram testados ao mesmo tempo tendo-se a possibilidade de avaliar a interação de efeitos, ou seja, avaliar a ação conjunta de dois ou três fatores. Quando a presença de um fator altera o comportamento do outro, tem-se a interação de efeitos.

As hipóteses  $H_0$  e  $H_1$  apresentadas acima são para verificar se existe ou não a interação dos efeitos. A hipótese  $H_0$  considera que as médias dos tratamentos são iguais, ou seja, não houve a influência dos fatores. A hipótese  $H_1$  considera que pelo menos uma média é diferente, ou seja, há uma interação de efeitos.

O resumo do quadro da Anova (TABELA 14) mostra que os valores de F encontrados para as interações A x B x C (4,93<sup>\*\*</sup>); A x B (140,52<sup>\*\*</sup>); A x C (5,22<sup>\*\*</sup>) e B x C (10,33<sup>\*\*</sup>) para os ensaios de tração foram altamente significativos, ou seja, significativos ao nível de 1% de probabilidade (o quadro completo da Anova está no ANEXO 3). Assim sendo, fica aceita a hipótese  $H_1$ , onde, pelo menos uma das interações é significativa.

A análise da variância revelou que os fatores A (granulometria), B (%madeira) e C (%compatibilizante) não são independentes, ou seja, as interações dos fatores são significativas. Assim sendo, o teste de Tukey para comparação das médias foi realizado em etapas, considerando-se cada um dos três fatores isoladamente (A x B), (A x C) e (B x C). Os resultados dos testes de Tukey podem ser vistos nas tabelas a seguir. Médias seguidas por uma mesma letra não diferem estatisticamente para o teste de Tukey ao nível de 5%.

TABELA 15 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MPa (GRANULOMETRIA X %MADEIRA)

TIPO DE RESÍDUO	%MADEIRA	
	10	30
PÓ-DE-LIXA	27,0 A	23,5 C
SERRAGEM	27,0 A	25,7 B

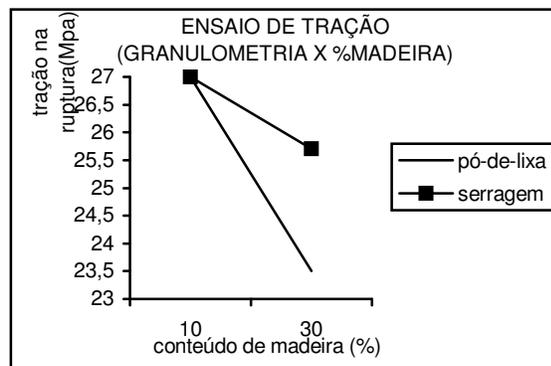
O teste de Tukey (TABELA 15) revelou que, para o pó-de-lixo o melhor resultado foi obtido para a composição com 10% de madeira. O produto com 30% de pó-de-lixo foi o que apresentou o pior resultado. Para a serragem, os resultados mostraram que a composição com 10% de madeira apresentou índices superiores que a composição com 30%.

Analisando-se os percentuais de madeira que entraram nas formulações dos compósitos, observa-se que para 10% de madeira o valor apresentado para os compósitos com serragem (27,0 MPa) foi igual aos compósitos com pó-de-lixia (27,0 MPa). Esses valores iguais indicam que não houve a influência da granulometria.

Por outro lado, considerando uma composição com 30% de madeira, a granulometria já teve influência, sendo que a serragem apresentou os melhores resultados.

A interpretação dos ensaios fatoriais pode também ser complementada por uma análise gráfica. Assim sendo, foram feitos gráficos das médias de um fator mantendo o outro fator na abscissa.

FIGURA 27 – CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO (GRANULOMETRIA X %MADEIRA)



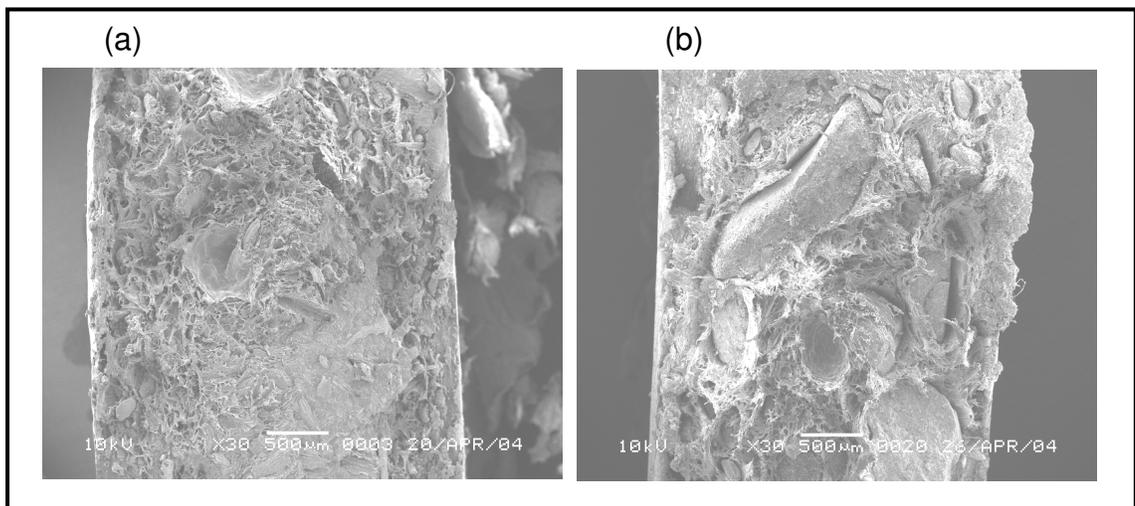
Através da FIGURA 27 pode-se observar que os comportamentos para o pó-de-lixia e para a serragem são semelhantes. Os melhores resultados, ou seja, as maiores resistências à tração foram observadas no menor percentual de madeira nas composições. O aumento de 10% para 30% de madeira nas formulações resultou numa diminuição das propriedades de resistência à tração. Esses resultados estão de acordo com os resultados apresentados por KIM, RYU e PARK (1998). Essa perda de resistência à tração foi mais acentuada para as composições com o pó-de-lixia.

Esse desempenho inferior dos compósitos com 30% de madeira, pode ser justificado pela maior dificuldade de se obter uma mistura homogênea

com o aumento do percentual de madeira. Na extrusora, as condições de mistura das fibras e matriz não foram ideais (item 5.4.1). A dispersão do pó-de-lixo foi ainda mais difícil do que a serragem, resultando na formação de agregados que causam o enfraquecimento da adesão fibra-matriz. Quanto maior o conteúdo de pó-de-lixo nas formulações dos compósitos, maior foi a formação de agregados.

A FIGURA 28 são micrografias obtidas pela MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) de amostras fraturadas nos ensaios de tração. Nas fotos é possível observar a diferença na dispersão das fibras na matriz.

FIGURA 28 – MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A DIFERENÇA NA DISPERSÃO DAS FIBRAS



NOTAS: (a) = compósito 30S (30% de serragem) com aumento de 30 vezes  
 (b) = compósito 30P (30% de pó-de-lixo) com aumento de 30 vezes

Em (a) (30% de serragem) o aspecto do compósito apresenta uma boa dispersão. Já em (b) (30% de pó-de-lixo), é possível ver a formação de agregados, mostrando que a dispersão das fibras não foi muito eficiente.

A TABELA 16 mostra os resultados do teste de Tukey para os ensaios de resistência à tração considerando os fatores Granulometria e % de compatibilizante.

TABELA 16 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MPa (GRANULOMETRIA X %COMPATIBILIZANTE)

TIPO DE RESÍDUO	%COMPATIBILIZANTE			
	0	1	2	3
PÓ-DE-LIXA	23,1 C	25,3 B	26,4 A	26,0 B
SERRAGEM	24,3 B	26,0 B	27,4 A	27,7 A

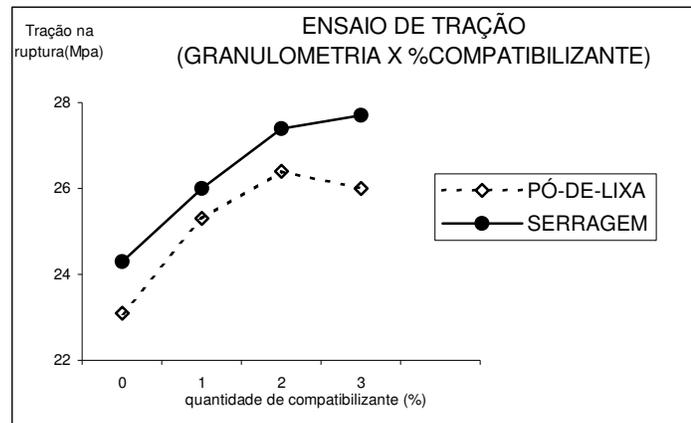
O teste de Tukey revelou que, para os compósitos a partir do pó-de-lixo, a composição com 2% de compatibilizante (26,4 MPa) apresentou um resultado estatisticamente superior aos demais. A seguir vieram as composições com 3% e 1% de compatibilizante com os valores de 26,0 MPa e 25,3 MPa respectivamente, considerados estatisticamente iguais entre si. O pior resultado foi observado nas formulações com pó-de-lixo sem compatibilizante (23,1 MPa), que foi considerado estatisticamente inferior a todas as outras.

Para os compósitos com a serragem, os resultados mostraram que as composições com 2% e 3% de compatibilizante foram estatisticamente superiores. Ainda que os compósitos com serragem mais 1% de compatibilizante tenham apresentado índices superiores às composições sem compatibilizante, os resultados foram considerados estatisticamente iguais.

Ainda com base na mesma TABELA 16, analisando-se os percentuais de compatibilizante que entraram nas formulações, observa-se que os três melhores resultados foram obtidos com 3% de compatibilizante para os compósitos com serragem e 2% de compatibilizante para as duas granulometrias. Ou seja, considerando uma composição com 3% de compatibilizante, a granulometria já teve influência, sendo que os valores encontrados para a serragem (27,7 MPa) foram considerados estatisticamente superiores aos compósitos com pó-de-lixo (26,0 MPa).

Para as composições com 1% e 2% de compatibilizante não houve a influência da granulometria.

FIGURA 29 - CURVAS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA COMPÓSITOS COM PÓ-DE-LIXA E SERRAGEM EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE COMPATIBILIZANTE (GRANULOMETRIA X %COMPATIBILIZANTE)



Através da FIGURA 29 pode-se observar que os comportamentos das curvas para pó-de-lixo e para a serragem são semelhantes. Quanto maior o percentual de compatibilizante nas composições, tanto para o pó-de-lixo quanto para a serragem, houve uma melhora na propriedade de resistência à tração. Os melhores resultados para a serragem foram observados com 3% de compatibilizante.

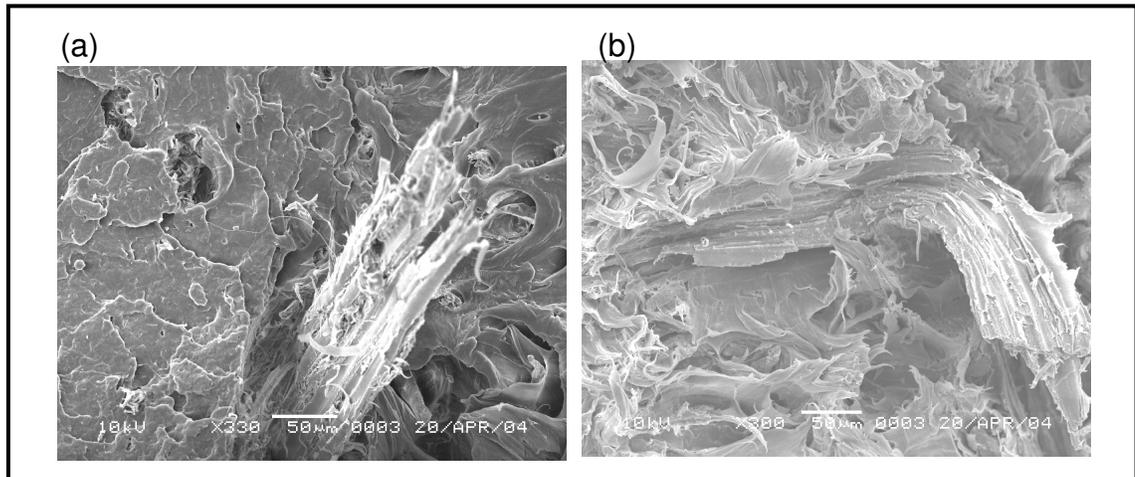
Entretanto, para os compósitos a partir do pó-de-lixo, a maior resistência à tração foi observada nos compósitos com 2% de compatibilizante. Contrário às formulações com serragem, para os compósitos com o pó-de-lixo, o acréscimo para 3% de compatibilizante resultou numa diminuição da resistência à tração.

Esse comportamento, ou seja, a diminuição da resistência à tração com o aumento para 3% de compatibilizante para os compósitos com pó-de-lixo pode ter várias causas. Um desses fatores pode ser justificado pelas dificuldades encontradas durante a produção dos compósitos com pó-de-lixo (essas dificuldades serão discutidas no item 5.4 – Análise da Extrusora).

As dificuldades foram maiores para a produção dos compósitos 30P3% (30% de pó-de-lixia mais 3% de anidrido maleico). Essas dificuldades acabaram resultando na formação de agregados de madeira que interferiram na propriedade de resistência à tração do compósito.

A FIGURA 30 mostra micrografias obtidas na MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) de amostras fraturadas no ensaio de tração. Nessas micrografias é possível observar a influência do compatibilizante nos compósitos.

FIGURA 30 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DO COMPATIBILIZANTE



NOTAS:.(a) = compósito 10P (10% de pó-de-lixia sem compatibilizante) com aumento de 330 vezes

.(b) = compósito 10P3% (10% de pó-de-lixia + 3% compatibilizante) com aumento de 330 vezes

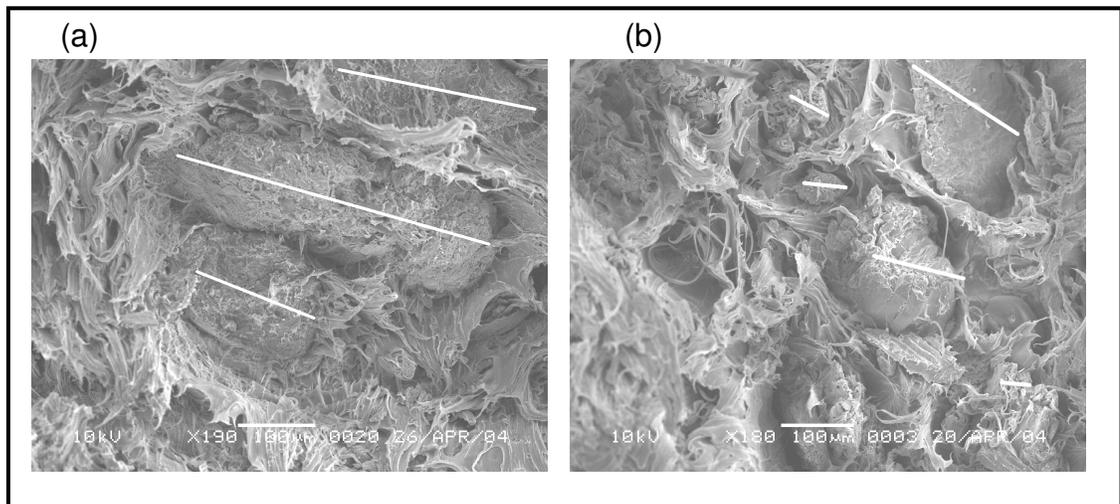
A foto (a) é de uma amostra 10P (10% de pó-de-lixia sem compatibilizante). Observa-se que, sem a presença de compatibilizante, a fibra está solta e a matriz não tem aspecto dúctil. Já na foto (b) 10P3% (10% de pó-de-lixia mais 3% de compatibilizante) a matriz apresenta um aspecto dúctil e a fibra está aderida à matriz.

Embora a foto (b) mostre que para 10P3% (10% de pó-de-lixia mais 3% de compatibilizante) houve boa compatibilização entre a fibra e a matriz, na

média, os compósitos com 3% de compatibilizante apresentaram uma diminuição na resistência à tração. Isso demonstra que pode ter outros fatores interferindo na resistência à tração do compósito, por exemplo, a dispersão das fibras.

A FIGURA 31 mostra uma micrografia da MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) da fratura de uma amostra submetida ao ensaio de tração. Nas fotos é possível observar a influência da granulometria na dispersão das fibras.

FIGURA 31 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA DISPERSÃO DAS FIBRAS



NOTAS: .(a) = compósito 30P3%(30% de pó-de-lixia + 3% compatibilizante) com aumento de 190 vezes  
 .(b) = compósito 30S3% (30% de serragem + 3% compatibilizante) com aumento de 180 vezes

Na FIGURA 31, observa-se que tanto em (a) compósito a partir do pó-de-lixia, quanto em (b) compósito a partir da serragem, houve a indesejável formação dos agregados.

Entretanto, os diâmetros dos agregados em (b) madeira de serragem, são menores que os agregados formados nos compósitos de (a) pó-de-lixia. Isso mostra que a mistura na extrusora monorroscas não foi eficiente nas condições utilizadas.

Em (a) (30% pó-de-lixia mais 3% compatibilizante) não houve uma boa dispersão das fibras, resultando em formação de agregados maiores (diâmetros de até 450  $\mu\text{m}$ ). Em (b) (30% serragem mais 3% compatibilizante) a dispersão foi melhor, com formação de agregados menores (diâmetros de até 150  $\mu\text{m}$ ).

Mesmo com a formação dos agregados, tanto na foto (a) quanto em (b) observa-se o aspecto dúctil da matriz devido à presença do compatibilizante, indicando que houve uma boa adesão. Isso mostra que, o baixo desempenho do compósito a base de pó-de-lixia, foi devido à má dispersão das fibras que resultou na formação de agregados.

A seguir a TABELA 17 mostra os resultados do teste de Tukey para os ensaios de tração considerando os fatores % de madeira e % de compatibilizante.

TABELA 17 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM MPa (%MADEIRA X %COMPATIBILIZANTE)

QUANTIDADE DE MADEIRA	%COMPATIBILIZANTE			
	0	1	2	3
10%	24,8 C	27,2 AB	27,8 A	28,0 A
30%	22,6 E	24,1 D	26,1 B	25,7 C

O teste de Tukey (TABELA 17) revelou que, para 10% de madeira, as composições com 1%, 2% e 3% de compatibilizante apresentaram resultados estatisticamente iguais entre si e superiores à composição sem compatibilizante.

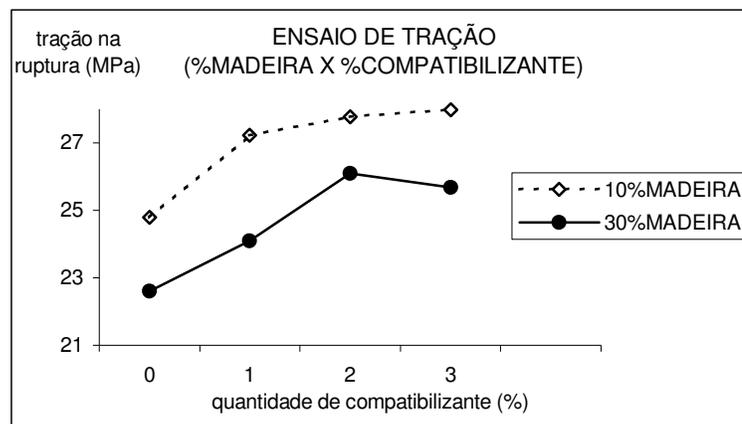
Para os compósitos com 30% de madeira, todas as formulações (com ou sem compatibilizante) apresentaram resultados considerados estatisticamente diferentes entre si. Os melhores resultados na resistência à tração para compósitos com 30% de madeira foram para formulações com 2% (26,1 MPa), 3% (25,7MPa), 1% (24,1 MPa) e 0% (22,6 MPa) de compatibilizante respectivamente.

Analisando-se os percentuais de compatibilizante que entraram nas composições, observa-se que os melhores resultados na resistência à tração foram obtidos para os compósitos com 10% de madeira mais compatibilizantes: 1% (27,2 MPa), 2% (27,8 MPa) e 3% (28,0MPa).

Os compósitos sem compatibilizante apresentaram os piores resultados tanto para as formulações com 10% como para 30% de madeira.

Através da FIGURA 32 pode-se observar que os comportamentos das curvas de 10% e 30% de madeira são semelhantes. Observa-se uma tendência de melhora da resistência à tração com o aumento de compatibilizante nas formulações.

FIGURA 32 – CURVAS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA COMPÓSITOS COM 10% E 30% DE MADEIRA EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE COMPATIBILIZANTE (GRANULOMETRIA X %COMPATIBILIZANTE).



Esses resultados eram, de certa forma, esperados, uma vez que vários autores como COUTINHO, COSTA e MELO (1999); KAZAYAWOKO, BALATINECZ e MATUANA (1999); CANTERO et al. (2003) e LU, WU e

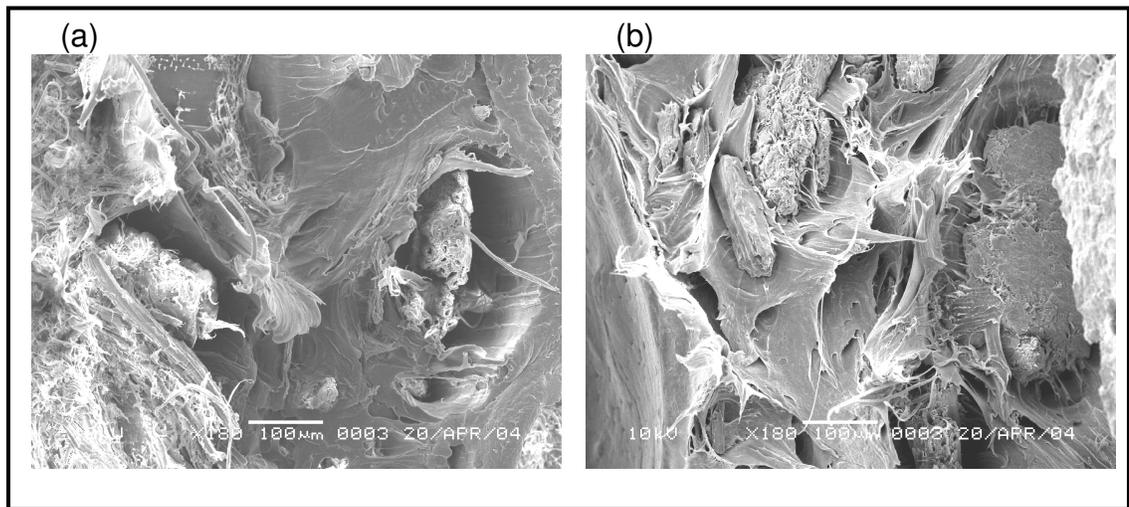
NEGULESCU (2004) entre outros, também obtiveram melhores resultados na resistência à tração com o aumento de agente compatibilizante nas formulações dos compósitos.

Os melhores resultados para as formulações com 10% de madeira foram observados com 3% de compatibilizante.

A FIGURA 33 mostra uma micrografia da MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) da fratura de amostras submetidas ao ensaio de tração.

As duas fotos (a) e (b) são de compósitos plástico-madeira com 10% de serragem. A foto (a) é o compósito sem compatibilizante. A foto (b) é o compósito com 3% de compatibilizante. Nas fotos é possível observar a influência do compatibilizante nos compósitos com mesma quantidade de madeira (10% de serragem).

FIGURA 33 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DO COMPATIBILIZANTE EM COMPÓSITOS COM 10% DE MADEIRA



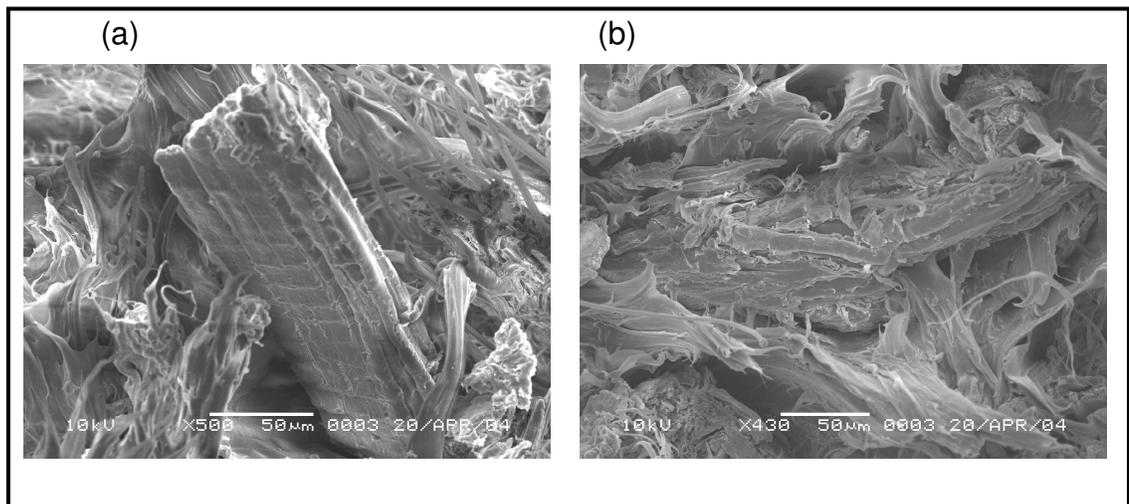
NOTAS: .(a) = compósito 10S (10% de serragem sem compatibilizante) com aumento de 180 vezes  
 .(b) = compósito 10S3% (10% de serragem + 3% compatibilizante) com aumento de 180 vezes

Em (a) (10% serragem sem compatibilizante) observa-se que a matriz não tem o aspecto dúctil, indicando baixa adesão. Também se pode observar que as fibras estão soltas na matriz. Em (b) (10% serragem mais 3% compatibilizante) o aspecto da matriz é dúctil, indicando a boa adesão das fibras à matriz.

A FIGURA 34 é uma micrografia da MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) mostrando a influência do compatibilizante nos compósitos com 30% de madeira.

As duas fotos (a) e (b) são de compósitos plástico-madeira com 30% de serragem. A foto (a) é o compósito sem compatibilizante. A foto (b) é o compósito com 3% de compatibilizante. Nas fotos é possível observar a influência do compatibilizante nos compósitos com mesma quantidade de madeira (30% de serragem).

FIGURA 34 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DE COMPÓSITOS MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DO COMPATIBILIZANTE EM COMPÓSITOS COM 30% DE MADEIRA



NOTAS: .(a) = compósito 30S (30% de serragem sem compatibilizante) com aumento de 500 vezes  
 .(b) = compósito 30S3% (30% de serragem + 3% compatibilizante) com aumento de 430 vezes

Em (a) (30% serragem sem compatibilizante) é possível observar o detalhe da fibra mal aderida na matriz indicando baixa adesão. Por outro lado, em (b) (30% serragem mais 3% compatibilizante) pode-se observar a fibra bem aderida. O aspecto da matriz é dúctil, indicando a boa adesão das fibras à matriz.

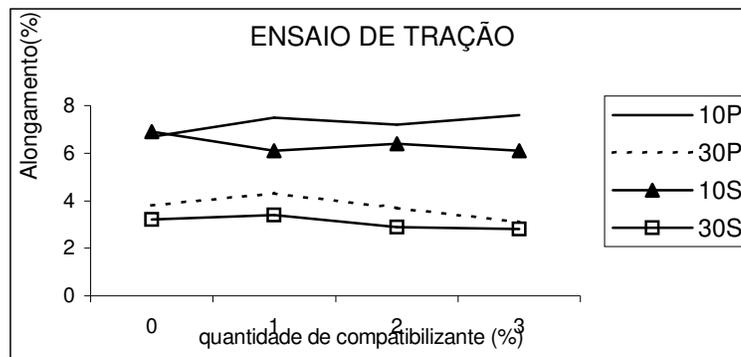
Para os compósitos com 30% de madeira (considerando a média das formulações com pó-de-lixo e serragem juntas), os melhores índices nos ensaios de tração foram observados com 2% de compatibilizante (26,1 MPa). Esse comportamento pode ser justificado porque a composição com 30P3% (30% de pó-de-lixo mais 3% anidrido) teve o desempenho prejudicado pela má dispersão das fibras na matriz (item 5.4.1) resultando num baixo desempenho no ensaio de tração (24,21 MPa) e afetando o cálculo da média para os ensaios de tração.

### 5.3.4 Alongamento

O PP puro teve um alongamento no escoamento de 10,9%. Para os compósitos com 10% de madeira o alongamento ficou entre 6,1 e 7,6%. Os compósitos com 30% de madeira apresentaram um alongamento de 2,8 a 4,3%.

A FIGURA 35 mostra os valores médios encontrados para a propriedade de alongamento dos compósitos.

FIGURA 35 – CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO (%)



NOTAS: .10P = 10% de pó-de-lixia  
 .30P = 30% de pó-de-lixia  
 .10S = 10% de serragem  
 .30S = 30% de serragem

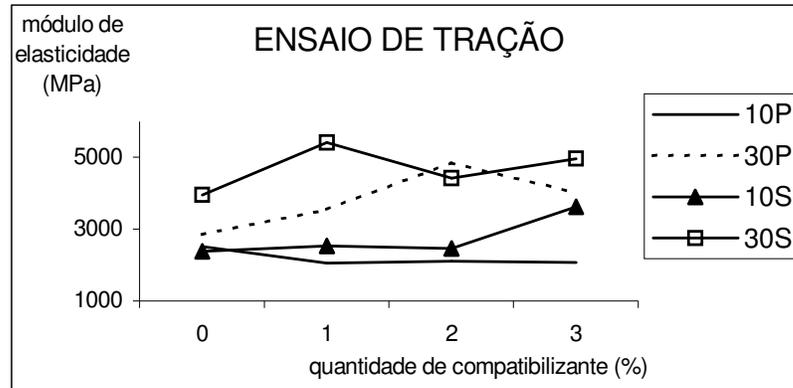
Observa-se na FIGURA 35 que as curvas de todos os produtos apresentam o mesmo comportamento, ou seja, as curvas não apresentam picos com a mudança no percentual de compatibilizantes. Isso demonstra que o aumento nas quantidades de compatibilizantes não teve influência nas propriedades de alongamento.

A FIGURA 35 mostra ainda que a quantidade de madeira nas formulações influenciou a propriedade de alongamento dos compósitos plástico-madeira. Os maiores percentuais de alongamento foram observados no menor percentual de madeira nas composições. Ou seja, tanto para o pó-de-lixia quanto para a serragem, o aumento de 10% para 30% de madeira resultou numa diminuição das propriedades de resistência ao alongamento.

### 5.3.5 Módulo de Elasticidade

A FIGURA 36 mostra os valores médios encontrados para o Módulo de elasticidade.

FIGURA 36 – CURVAS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) DO ENSAIO DE TRAÇÃO



NOTAS: .10P = 10% de pó-de-lixia  
 .30P = 30% de pó-de-lixia  
 .10S = 10% de serragem  
 .30S = 30% de serragem

Observa-se que a quantidade de madeira nos compósitos teve influência no módulo. Os maiores valores do Módulo de Elasticidade foram observados para as curvas com 30% de madeira (30S e 30P).

As curvas dos produtos apresentam picos conforme aumenta o percentual de compatibilizante, exceto a curva 10P que se apresentou estável ao longo do gráfico.

Para as outras curvas houve uma tendência de aumento nos valores do Módulo de Elasticidade com o maior percentual de compatibilizante.

Isso indica uma tendência de que o aumento nas quantidades de compatibilizantes teve influência no módulo de elasticidade.

De acordo com CANEVAROLO Jr. (2002), o módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a rigidez do polímero, ou seja, quanto maior for o valor do módulo, maior será a rigidez do polímero.

O valor do Módulo de Elasticidade para o PP puro foi de 1591 MPa. Para os compósitos com 10% de madeira o Módulo de Elasticidade ficou entre 2054 e 3636 MPa.

Nos compósitos com 30% de madeira o Módulo de Elasticidade variou de 2843 a 5426 MPa.

O maior valor do Módulo de Elasticidade para compósitos com 10% de madeira foi observado para 10S3% (10% de serragem mais 3% de compatibilizante).

Para os compósitos com 30% de madeira, o menor valor do Módulo de Elasticidade foi verificado para 30P (30% de pó-de-lixia sem compatibilizante) e o maior valor para 30S1% (30% de serragem com 1% de compatibilizante).

### 5.3.6 Análise Termogravimétrica

Embora o comportamento das curvas das análises termogravimétricas (TGA) tenha apresentado um comportamento semelhante para todos os produtos (ver ANEXO 7), a análise ajudou a identificar a incorporação da madeira nos compósitos plástico-madeira. Essa identificação foi feita com base na decomposição dos materiais submetidos à análise termogravimétrica.

Conforme a definição dada por MACKENZIE (1970), a análise termogravimétrica é uma técnica que permite avaliar as alterações de massa que sofre uma amostra quando submetidas a uma taxa de aquecimento.

Os resultados de decomposição dos materiais apresentados na TABELA 18 podem ser considerados baixos, se comparados com os ensaios para determinação do teor de cinzas. Entretanto, deve ser lembrado que as condições dos ensaios são diferentes nos dois testes. Por exemplo, na determinação do teor de cinzas as amostras são submetidas a uma temperatura de  $525 \pm 3^\circ \text{C}$  por um período de até seis horas. Enquanto, nesse estudo, os ensaios de TGA atingiram a temperatura final de  $327^\circ \text{C}$  e o tempo total do ensaio foi de 30 minutos.

A TABELA 18 mostra os resultados em termos de decomposição dos materiais ao final dos ensaios de TGA.

TABELA 18 – RESULTADO DA DECOMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS SUBMETIDOS À ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA

Tratamentos	Granulometria	%MADEIRA	DECOMPOSIÇÃO (%)
10P	Pó	10	96,6
20P		20	92,4
30P		30	92,9
10S	Serragem	10	97,4
20S		20	95,0
30S		30	93,4
PP	100% PP	0	98,8

Embora as formulações iniciais dos compósitos (antes da extrusão) tenham sido preparadas com 10, 20 e 30% de madeira, é necessário verificar como ficou a distribuição da madeira no compósito após a extrusão. Ou seja, confirmar a efetiva incorporação da madeira nos compósitos após a extrusão. Isso pôde ser confirmado através da análise TGA.

Os resultados das análises de TGA mostram que houve a incorporação da madeira nos compósitos plástico-madeira.

Na TABELA 18 observa-se que a decomposição do PP puro após o ensaio foi de 98,8%. A inclusão da madeira nos compósitos resultou num menor percentual de decomposição.

Esses resultados estão de acordo com FUAD et al. (1994) e ROUT; JENA e DAS (2003) que concluíram que quanto maior o percentual de biomassa incorporada nos compósitos, menor a porcentagem de decomposição e, portanto, mais estável é o compósito.

Esse comportamento está bem caracterizado nas análises dos compósitos com serragem. Os compósitos com 10% de serragem apresentaram uma decomposição de 97,4%. Com um aumento para 20% de madeira, a decomposição ficou em 95,0%. Para os compósitos com 30% de serragem as análises indicaram uma decomposição de 93,4%.

Quanto maior o percentual de madeira incorporada nos compósitos, menor foi o percentual de decomposição, ou seja, um aumento na quantidade de serragem nas formulações resultou em maiores teores de resíduo nas análises TGA.

A incorporação da madeira nos compósitos também está caracterizada nas curvas de decomposição (ANEXO 7). Quanto maior a quantidade de madeira nos compósitos, maior será o tempo para sua decomposição. Os gráficos mostram que, para o PP puro (100% PP) a decomposição acontece em apenas uma etapa e ocorre aos 21 min.

As curvas de TGA dos compósitos plástico-madeira mostram que a decomposição desses materiais acontece em duas etapas. A primeira etapa corresponde à decomposição do PP e a segunda à decomposição da madeira. A decomposição do compósito 10S (10% de madeira) ocorre aos 26 min; 20S (20% de madeira) aos 27 min e 30S (30% de madeira) aos 28 min.

Para os compósitos com pó-de-lixo (20P e 30P) observa-se que houve uma inversão nos valores, ou seja, o compósito com maior quantidade de pó-de-lixo (30%) apresentou um maior percentual de decomposição (92,9%) em relação ao compósito com 20% de pó-de-lixo que apresentou 92,4% de decomposição. Isso mostra que a incorporação do pó-de-lixo nos compósitos apresentou problemas.

Essa diferença pode ser justificada pela dificuldade de dispersão do pó-de-lixia que acabou formando agregados e puderam ser observados nas micrografias da MEV.

Esses agregados significam um acúmulo de madeira em determinados pontos, o que pode ter ocorrido com a amostra 20P (20% de pó-de-lixia) analisada. Na verdade, existe uma quantidade maior que 20% de madeira no compósito, que foi verificado pelo maior percentual de resíduo apresentado.

Esse tipo de problema também foi observado por MAPLESTON (2001), citando que uma das dificuldades no processamento dos compósitos plástico-madeira estava na alimentação e na mistura das partículas de madeira com menor densidade aparente.

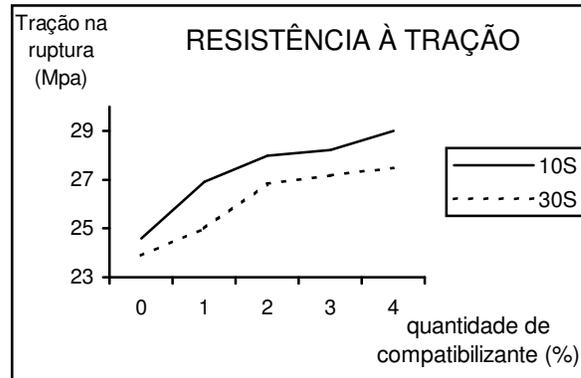
### 5.3.7 Compatibilizante

Os resultados dos testes de tração revelaram que o uso de compatibilizante nas formulações melhorou a propriedade de resistência à tração dos compósitos plástico-madeira.

Para verificar a tendência de aumento da resistência à tração com o acréscimo de compatibilizante, foram feitos testes elevando-se para até 4% o teor de compatibilizante para os dois produtos, 10S (10% de serragem) e 30S (30% de serragem), que apresentaram o melhor desempenho nos testes de resistência à tração.

A produção dos compósitos 10S4% (10% de serragem + 4% de anidrido maleico + 1% de peróxido de dibenzoila + 85%PP) e 30S4% (30% de serragem + 4% de anidrido maleico + 1% de peróxido de dibenzoila + 65%PP) foi feita na mesma extrusora e nas mesmas condições usadas na produção

FIGURA 37 – CURVAS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA OS COMPÓSITO 10S E 30S EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE COMPATIBILIZANTE



NOTAS: .10S = 10% de serragem  
.30S = 30% de serragem

Para os compósitos com 10% de serragem, o acréscimo de 4% de compatibilizante resultou numa resistência à tração de 29,01 MPa, que representa uma melhora de 17,9% na propriedade de resistência à tração em relação ao mesmo produto sem compatibilizante.

A resistência à tração nos compósitos com 30% de serragem com a adição de 4% de compatibilizante foi de 27,48 MPa, que significa uma melhora de 15% em relação ao mesmo produto sem a adição de compatibilizante.

A FIGURA 37 mostra que as curvas não se estabilizaram, ou seja, um aumento de compatibilizante (maior que 4%) nas formulações deve resultar em maiores valores nas resistências à tração.

### 5.3.8 Iniciador

Na produção dos compósitos plástico-madeira, juntamente com o compatibilizante foi adicionado o peróxido de dibenzoila como agente iniciador.

De acordo com MALDAS e KOKTA (1991) a presença de um peróxido orgânico é essencial durante o tratamento de fibras celulósicas com anidrido maleico.

Os peróxidos orgânicos são fontes de radicais livres. A decomposição térmica gera muitos radicais livres (RO·) que são capazes de abstrair o átomo de hidrogênio do polímero dando origem a ligações primárias entre as macromoléculas, resultando em um retículo tridimensional. Esses radicais são capazes de desencadear reações de enxertia com o anidrido maleico. O efeito do iniciador pode-se dar também pela quebra das cadeias, diminuindo o peso molecular, e facilitando a dispersão (COSTA, 1997; RABELLO, 2000; SPECIALCHEM, 2004).

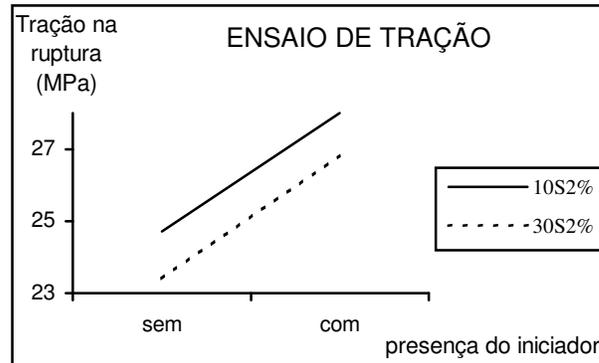
Para verificar a influência do agente iniciador nas propriedades mecânicas dos compósitos, foram realizados testes em formulações com e sem a presença do peróxido de dibenzoila.

Os testes foram realizados para os produtos 10S2% (10% de serragem + 2% de anidrido maleico + 0,5% de peróxido de dibenzoila) e 30S2% (30% de serragem + 2% de anidrido maleico + 0,5% de peróxido de dibenzoila).

Os dois produtos acima citados foram produzidos também com uma nova formulação, ou seja, sem a presença do agente iniciador (peróxido). Os novos produtos ficaram com a formulação 10S2% (10% de serragem + 2% de anidrido maleico sem peróxido de dibenzoila) e 30S2% (30% de serragem + 2% de anidrido maleico sem peróxido de dibenzoila).

Após a produção dos compósitos, foram feitos corpos de prova para ensaios de tração. Os resultados dos ensaios para verificar a influência do agente iniciador pode ser visto na FIGURA 38.

FIGURA 38 - CURVAS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA OS COMPÓSITOS 10S2% E 30S2% EM FUNÇÃO DA PRESENÇA OU NÃO DO AGENTE INICIADOR



NOTAS: .10S2% = 10% de serragem + 2% de anidrido maleico + 0,5% de peróxido de dibenzoila  
 .30S2% = 30% de serragem + 2% de anidrido maleico + 0,5% de peróxido de dibenzoila  
 .sem = compósito sem a presença do peróxido  
 .com = compósito com a presença do peróxido

A FIGURA 38 mostra que, para os dois produtos (10S2% e 30S2%), a presença do peróxido de dibenzoila resultou em maiores valores na resistência à tração. Isso demonstra que a presença do agente iniciador foi importante para melhorar a propriedade de resistência à tração dos compósitos.

### 5.3.9 Ensaio de Impacto

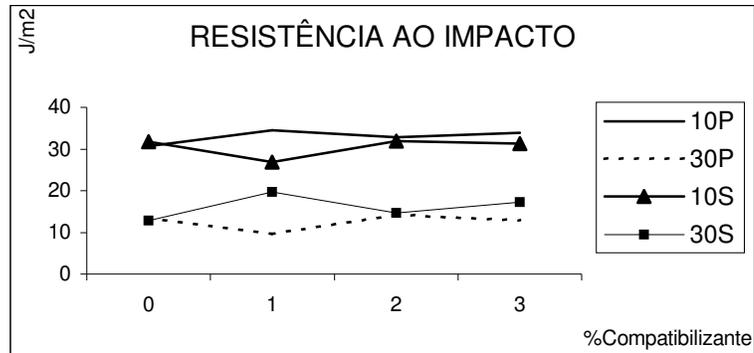
No ensaio de impacto (Charpy) os corpos de prova de PP puro não romperam. Para os compósitos plástico-madeira com 10% de madeira a resistência ao impacto ficou entre 27 e 34 J/m<sup>2</sup>. Os compósitos com 30% de madeira apresentaram uma resistência ao impacto que variou de 10 a 20 J/m<sup>2</sup>.

As maiores resistências ao impacto foram observadas nos compósitos com menor percentual de madeira (10S e 10P). Tanto para o pó-

de-lixo quanto para a serragem, o aumento de 10% para 30% de madeira resultou numa diminuição das propriedades de resistência ao impacto.

A FIGURA 39 mostra os valores médios encontrados no teste de impacto.

FIGURA 39 – CURVAS DO TESTE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO



NOTAS: .10P = 10% de pó-de-lixo  
 .30P = 30% de pó-de-lixo  
 .10S = 10% de serragem  
 .30S = 30% de serragem

Na FIGURA 39 pode-se observar que o aumento nas quantidades de compatibilizante nas formulações dos compósitos não teve influência na propriedade de resistência ao impacto em nenhuma das quatro curvas (10P, 30P, 10S e 30S).

### 5.3.10 Outras Propriedades

Na TABELA 19 são apresentadas as médias dos valores encontrados nos testes de densidade, teor de umidade, absorção de água em 24h, capacidade de absorção máxima de água e inchamento em espessura dos compósitos plástico-madeira.

TABELA 19 – MÉDIAS DOS VALORES ENCONTRADOS PARA DENSIDADE, TEOR DE UMIDADE, ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA

Tratamentos	Granulometria	Madeira (%)	Compatibilizante (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Umidade (%)	Absorção de água 24h (%)	Absorção máxima de água (%)	Inchamento espessura (%)
10P	Pó	10	0	0,86	0,3	0,1	0,4	0,3
10P1%			1	0,86	0,3	0,1	0,3	0,2
10P2%			2	0,88	0,3	0,1	0,3	0,2
10P3%			3	0,88	0,3	0,1	0,3	0,2
30P		30	0	0,94	0,8	0,3	1,1	0,8
30P1%			1	0,93	0,9	0,3	0,9	0,8
30P2%			2	0,92	0,8	0,2	0,8	0,8
30P3%			3	0,94	0,7	0,1	0,7	0,8
10S	Serragem	10	0	0,86	0,3	0,2	0,4	0,4
10S1%			1	0,86	0,3	0,1	0,3	0,4
10S2%			2	0,86	0,3	0,1	0,3	0,2
10S3%			3	0,86	0,3	0,1	0,3	0,3
30S		30	0	0,93	1,1	0,4	1,2	0,8
30S1%			1	0,93	1,1	0,3	1,2	0,7
30S2%			2	0,94	1,1	0,2	1,5	0,9
30S3%			3	0,93	0,8	0,1	0,8	0,8
100%PP	-	0	0	0,88	0,1	0	0,1	0

NOTA: .a descrição completa de todos os tratamentos está no ANEXO 1.

Uma das vantagens citadas para o compósito plástico-madeira é a baixa densidade. Observando os resultados da TABELA 19 nota-se que a densidade dos compósitos com 30% de madeira é maior que a densidade do PP puro.

Entretanto, é importante lembrar que a baixa densidade do compósito plástico-madeira é em relação a outros compósitos com cargas minerais.

Como exemplo pode ser citado o trabalho de SANADI et al. (1995) que estudaram compósitos de PP com diversas cargas minerais. Usando a mesma quantidade (40% em peso) para todas as cargas, os autores encontram uma densidade de 1,23 g/cm<sup>3</sup> para compósitos com fibra de vidro; 1,25 g/cm<sup>3</sup> para compósitos com a mica e 1,26 g/cm<sup>3</sup> para compósitos com carbonato de cálcio.

Os resultados encontrados nesse estudo confirmam a baixa densidade dos compósitos plástico-madeira, quando comparados com outros compósitos.

A densidade calculada dos compósitos variou entre 0,86 e 0,94 g/cm<sup>3</sup>. A densidade encontrada no experimento para o PP foi de 0,88 g/cm<sup>3</sup>.

Para os compósitos plástico-madeira com 10% de madeira (pó-de-lixo e serragem) a densidade ficou entre 0,86 e 0,88 g/cm<sup>3</sup>. Os compósitos com 30% de madeira apresentaram as maiores densidades que variaram entre 0,92 e 0,94 g/cm<sup>3</sup>.

Esses resultados estão de acordo com o resultados apresentados por CARASCHI e LEÃO (2002). Os autores encontraram uma densidade de 0,95 g/cm<sup>3</sup> para compósitos com 25% de madeira e de 1,01 g/cm<sup>3</sup> para compósitos com 40% de madeira.

#### 5.3.11 Teor de Umidade

O teor de umidade dos compósitos, quando expostos às condições ambientes, variou entre 0,3 e 1,1%.

A maior diferença foi observada entre os compósitos com 10% e 30% de madeira. Para os compósitos com 10% de madeira (pó-de-lixo e serragem) o teor de umidade foi de 0,3%.

Os compósitos com 30% de madeira apresentaram teores de umidade maiores que variaram entre 0,7 e 1,1%.

### 5.3.12 Absorção de Água

A absorção máxima de água para os compósitos com 10% de madeira foi obtida após seis semanas de imersão completa dos corpos de prova em água. Para os compósitos com 30% de madeira foram necessários oito semanas de imersão para que os mesmos atingissem a máxima absorção de água. A absorção de água do PP puro foi de 0,1%.

De maneira geral, os compósitos com 30% de madeira tiveram maior absorção de água do que os compósitos com 10% de madeira.

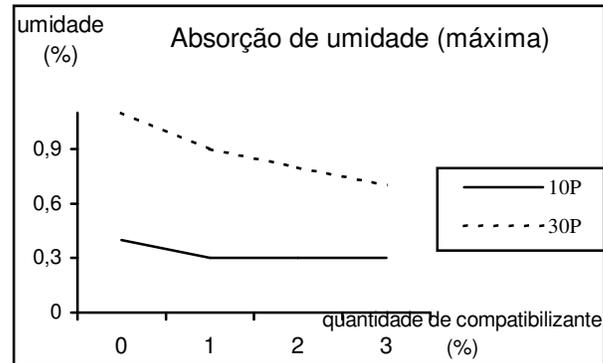
A absorção máxima de água nos compósitos com 10% de madeira ficou entre 0,3 e 0,4%, sendo que os maiores valores foram observados para 10S (10% de serragem sem compatibilizante) e 10P (10% de pó-de-lixo sem compatibilizante).

Para os compósitos com 30% de madeira a absorção máxima de água variou entre 0,7 e 1,5%, sendo que a menor absorção foi verificada para o compósito 30P3% (30% de pó-de-lixo com 3% de compatibilizante).

A absorção de água também foi maior nos compósitos sem compatibilizante. Isso é uma indicação de que o agente compatibilizante pode ter um efeito de proteção contra a penetração de água.

COUTINHO e COSTA (1999) citam que a presença de agente compatibilizante nos compósitos plástico-madeira pode agir como uma barreira contra a umidade nas fibras de madeira.

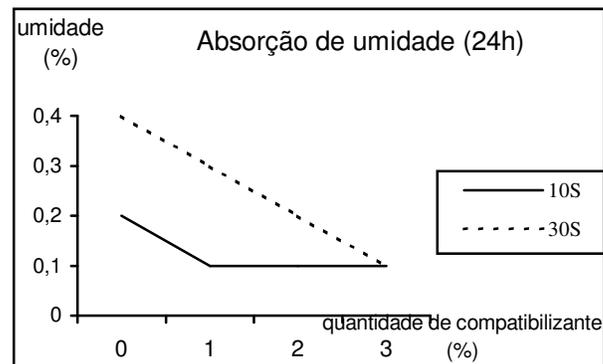
FIGURA 40 – GRÁFICO DA ABSORÇÃO MÁXIMA DE UMIDADE PARA OS COMPÓSITOS 10P E 30P



NOTAS: .10P = 10% de pó-de-lixia  
.30P = 30% de pó-de-lixia

Na FIGURA 40 observa-se que para a curva 30P (30% de pó-de-lixia) com o aumento do percentual de compatibilizante houve uma redução na absorção de umidade dos compostos. Para a curva 10P (10% de pó-de-lixia) esta tendência não está tão acentuada, entretanto, observa-se que com a adição do compatibilizante houve uma redução na absorção de umidade.

FIGURA 41 – GRÁFICO DA ABSORÇÃO DE UMIDADE (IMERSÃO 24h) PARA OS COMPÓSITOS 10S E 30S



NOTAS: .10S = 10% de serragem  
.30S = 30% de serragem

A FIGURA 41 mostra as curvas de absorção de água após 24h de imersão para os produtos 10S (10% de serragem) e 30S (30% de serragem). Observa-se que, para a curva 30S houve uma redução na absorção de água com o aumento do percentual de compatibilizante. Para a curva 10S observa-se que com a adição de 1% do compatibilizante houve uma redução na absorção de umidade.

### 5.3.13 Inchamento em Espessura

O inchamento em espessura dos compósitos, quando atingiram a capacidade máxima de absorção de água, variou entre 0,2 e 0,9%.

Para os compósitos com 10% de madeira (pó-de-lixo e serragem) o inchamento ficou entre 0,2 e 0,4%. Os maiores valores foram observados para os compósitos com 30% de madeira onde o inchamento em espessura variou entre 0,7 e 0,9%.

Esses valores estão de acordo com os resultados obtidos por COUTINHO e COSTA (1999), que trabalharam com compósitos (10% e 20% de madeira) submetidos à imersão em água por 90 dias e verificaram que as dimensões das amostras não tiveram alterações significativas.

Os resultados mostram que os compósitos plástico-madeira podem ser considerados materiais com boa estabilidade dimensional. Por exemplo, segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1984), o inchamento da madeira pode variar entre 2,5 a 11% (sentido radial) e 3,5 a 15% (sentido tangencial). Tratando-se de chapas de partículas de madeira, por exemplo, o aglomerado, o inchamento em espessura pode ultrapassar 50%.

### 5.3.14 Reciclagem

A média dos valores obtidos em cada ensaio podem ser vistas na TABELA 20.

TABELA 20 – MÉDIAS DOS VALORES OBTIDOS EM CADA ENSAIO (RECICLAGEM)

Tratamentos	Extrusão (reciclagem)	Compatibilizante (%)	Madeira (%)	Tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo (MPa)	Impacto (J/m <sup>2</sup> )
1	1X	0	10	24,6	6,9	2381	32
2			30	23,9	3,2	3960	13
3		2	10	28,0	6,4	2455	32
4			30	26,85	2,9	4424	15
5	2X	0	10	25,69	7,1	1993	32
6			30	23,01	3,5	3043	17
7		2	10	28,65	6,2	2249	29
8			30	28,08	3,0	3729	17
9	3X	0	10	26,5	7,2	2254	31
10			30	23,34	3,9	3155	16
11		2	10	29,1	6,4	2237	27
12			30	28,58	3,2	3520	22

NOTAS: .1X = uma extrusão

.2X = duas extrusões (reciclagem)

.3X = três extrusões (dupla reciclagem)

O processo de reciclagem do compósito plástico-madeira apresentou uma série de facilidades em relação à extrusão reativa (primeira extrusão).

Na reciclagem o manuseio dos produtos foi mais fácil, uma vez que se trabalha com materiais granulados.

A alimentação da extrusora não apresentou nenhum problema com o material granulado como o observado com a alimentação das formulações com o pó-de-lixia.

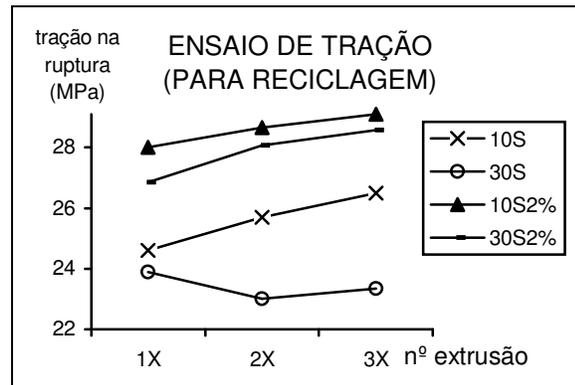
Com a reciclagem pode ocorrer uma degradação térmica da madeira. Entretanto, de acordo com SAPIEHA; PUPO e SCHREIBER (1989), quando a celulose é aquecida, mudanças física e química ocorrem.

As mudanças químicas incluem a redução do grau de polimerização através da cisão de ligações, geração de radicais livres, formação de grupos carbonila e carboxila entre outros. Assim sendo, apesar da degradação das fibras celulósicas causar enfraquecimento das fibras, o desenvolvimento de reações, com a formação de grupos carboxilas podem resultar no aumento da resistência mecânica em compósitos devido à formação de fortes ligações de adesão na interface fibra-matriz.

De acordo com os resultados do ensaio de tração, pode se observar que:

- Os processos de reciclagem melhoram a propriedade de resistência à tração para as formulações dos compósitos com compatibilizante (FIGURA 42). Isso pode ser um indicativo de que as reações não se completaram na primeira extrusão e foram sendo concluídas no processo de reciclagem;
- o maior ganho na resistência à tração após a reciclagem foi observado para o compósito 10S3X (10% de serragem sem compatibilizante com 3 extrusões) que foi 7,7% superior em relação à sua primeira extrusão. Nesse compósito (10S3X) não há a presença de compatibilizantes, portanto, o ganho na resistência pode ser atribuído à melhor dispersão das fibras com a reciclagem;
- o compósito 10S2%3X (10% de serragem mais 2% compatibilizante com 3 extrusões) foi o que apresentou a melhor média de resistência à tração (29,1 MPa), sendo 3,9% superior ao seu desempenho na primeira extrusão;
- mesmo após a reciclagem, os compósitos com compatibilizante (10S2% e 30S2%) continuaram apresentando os maiores índices de resistência à tração em relação aos compósitos sem compatibilizante.

FIGURA 42 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS E RECICLADOS



NOTA: .10S = 10% de serragem

.30S = 30% de serragem

.10S2% = 10% de serragem + 2% compatibilizante

.30S2% = 30% de serragem + 2% compatibilizante

Para a avaliação do experimento foram feitas as análises estatísticas considerando os ensaios de tração e envolveram as seguintes etapas:

- Teste de homogeneidade das variâncias (teste de Bartlett);
- Análise da variância;
- Teste de comparação de médias (teste de Tukey).

TABELA 21 – RESUMO DA ANOVA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA RECICLADOS

Fonte de variação	Bartlett	F
A x B x C	0,1189	3,6**
A x C	-	0,65 <sup>ns</sup>
B x C	-	34,1**

NOTA: A = % de madeira

B = % de compatibilizante

C = nº de extrusões

\*\* = significativo a 1% de probabilidade

ns = não significativo

Nesse estudo três fatores, % de madeira (A), % de compatibilizante (B) e nº de extrusões (C) foram testados ao mesmo tempo tendo-se a possibilidade de avaliar a interação de efeitos, ou seja, avaliar a ação conjunta de dois ou três fatores. Quando a presença de um fator altera o comportamento do outro, tem-se a interação de efeitos.

Duas hipóteses  $H_0$  e  $H_1$  são apresentadas para verificar se existe ou não a interação dos efeitos.

A hipótese  $H_0$  considera que as médias dos tratamentos são iguais, ou seja, não houve a influência dos fatores. A hipótese  $H_1$  considera que pelo menos uma média é diferente, ou seja, há uma interação de efeitos.

O resultado do teste de Bartlett (TABELA 21) mostra que as variâncias podem ser consideradas como homogêneas. A análise da variância com os tratamentos em arranjo fatorial, duas hipóteses foram testadas:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_{15}$
- $H_1$ : pelo menos uma média é diferente

O resumo do quadro da Anova (TABELA 21) (o quadro completo está no ANEXO 5) mostra que o valor de F encontrado para a interação A x C (0,65<sup>ns</sup>) foi não significativa, indicando que não há interação entre o fator A (%Madeira) e C (nº de Extrusões).

Os valores de F encontrados para as interações A x B x C (%Madeira x %Compatibilizante x nº de extrusão) e B x C para o ensaio de tração foram significativos ao nível de 1% de probabilidade. Fica aceita, portanto, a hipótese  $H_1$ , onde as interações são significativas.

A análise da variância revelou que os fatores A (%Madeira), B (%Compatibilizante) e C (nº de extrusão) não são independentes, ou seja, as interações são significativas.

Assim sendo, o teste de Tukey para comparação das médias foi realizado em etapas, considerando-se cada um dos fatores isoladamente (A x C) e (B x C).

O interesse dessa análise (reciclagem) é verificar, exclusivamente, a influência do número de extrusões (fator C), a interação A (%Madeira) x B (%Compatibilizante) já foi discutida.

Da mesma forma, para a análise dos resultados será considerado o comportamento dos compósitos plástico-madeira em função do número de extrusões (reciclagem).

Os resultados dos testes de Tukey podem ser vistos nas tabelas a seguir. Médias seguidas por uma mesma letra não diferem estatisticamente para o teste de Tukey ao nível de 5%.

TABELA 22 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO EM MPa (%MADEIRA X N° DE EXTRUSÕES)

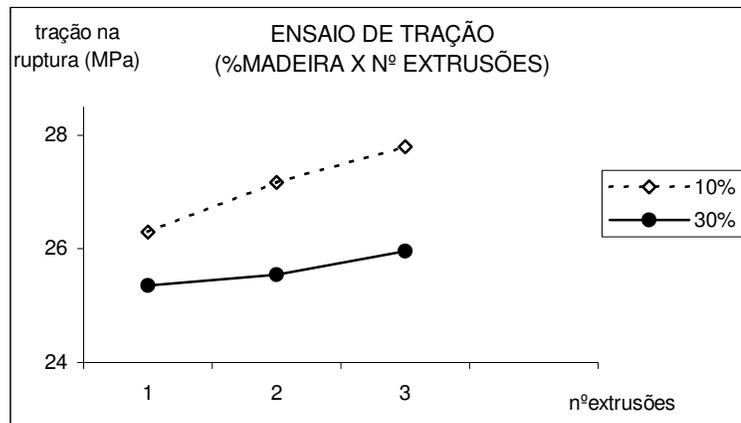
Conteúdo de madeira (%)	N° DE EXTRUSÕES		
	1x	2x	3x
10	26,30	27,17	27,80
30	25,36	25,55	25,96
MÉDIAS	25,80 B	26,36 B	26,88 A

Considerando que a interação A x C (%Madeira x nº de Extrusões) foi não significativa, os valores utilizados para o teste de Tukey foram as médias.

O teste de Tukey (TABELA 22) revelou que o número de extrusões influenciou na propriedade de tração.

Os compósitos reciclados (com três extrusões) foram os que apresentaram a melhor média (26,88 MPa), sendo considerado estatisticamente superior aos respectivos produtos com uma e duas extrusões.

FIGURA 43 - CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA OS COMPÓSITOS COM 10% E 30% DE MADEIRA EM FUNÇÃO DA RECICLAGEM (%MADEIRA X N° DE EXTRUSÕES)



NOTAS: .10% = 10% de madeira  
.30% = 30% de madeira

Através da FIGURA 43 pode-se observar que os comportamentos das duas curvas são semelhantes. Há uma tendência de melhora na propriedade de resistência à tração com o maior número de extrusões. Os melhores resultados foram observados com 3 extrusões.

TABELA 23 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO EM MPa (%COMPATIBILIZANTE X N° DE EXTRUSÕES)

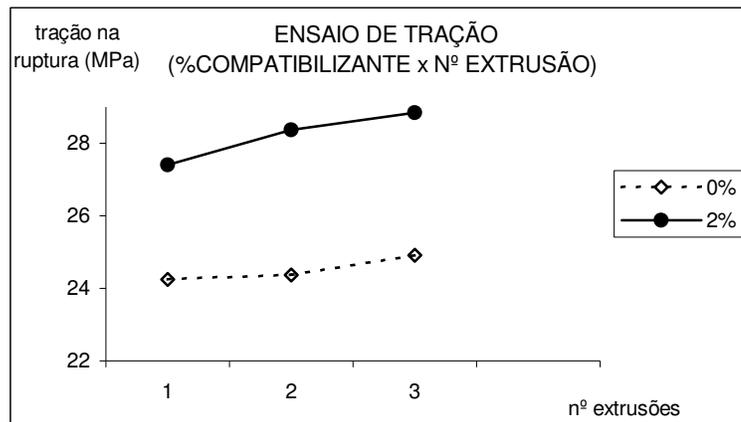
Compatibilizante (%)	Nº EXTRUSÕES		
	1x	2x	3x
0	24,25 D	24,36 D	24,92 C
2	27,41 B	28,36 A	28,84 A

O teste de Tukey (TABELA 23) revelou que, para os compósitos com 2% de Compatibilizante, a reciclagem (2 e 3 extrusões) melhorou as propriedades de tração.

Os resultados para 2x (28,36 MPa) e 3x (28,84 MPa) foram estatisticamente superiores à primeira extrusão (27,41 MPa).

Para os compósitos sem compatibilizante (0%) a reciclagem não trouxe nenhuma melhora na propriedade de tração. Isso é um indicativo de que não houve melhora da adesão pela geração de carboxilas, ou seja, não deve estar ocorrendo a degradação térmica das fibras.

FIGURA 44 – CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA COMPÓSITOS COM 0% E 2% DE COMPATIBILIZANTE EM FUNÇÃO DA RECICLAGEM (%COMPATIBILIZANTE X N° EXTRUSÕES)



NOTAS: .0% = sem compatibilizante  
.2% = 2% de compatibilizante

Através da FIGURA 44 pode-se observar que há diferença nos comportamentos das curvas de 0% e 2% de compatibilizante.

Observa-se uma tendência de melhora da resistência à tração com o aumento de extrusões para a curva com 2% de compatibilizante nas formulações.

Os melhores resultados para as formulações com 2% de compatibilizante foram observados com três extrusões.

Essa melhora na propriedade de tração com a reciclagem pode ser justificada pela melhora na qualidade da mistura dos compósitos. Os testes indicam que a extrusão simples (uma extrusão) não foi suficiente para conseguir uma boa mistura.

Alguns fatores que interferiram na qualidade dos compósitos foram o diâmetro do funil e o tipo e rosca utilizado. Com a reciclagem (maior número de extrusões) a qualidade da mistura melhorou, resultando em compósitos com melhor propriedade.

Ainda que as fibras de madeira tenham uma melhor dispersão com a reciclagem, sem a presença do compatibilizante não houve uma melhora na propriedade de tração. Isso demonstra a importância do compatibilizante na produção do compósito plástico-madeira.

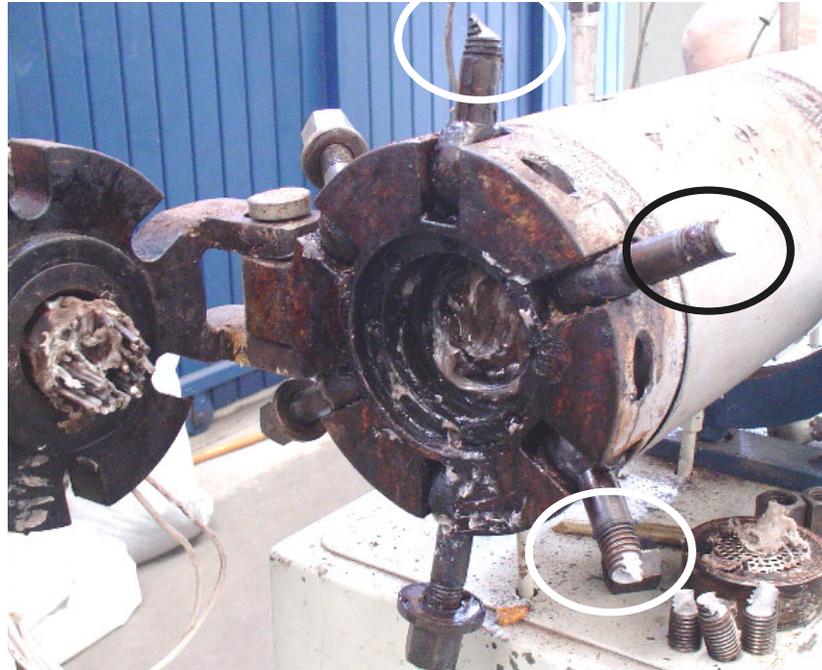
#### 5.4 ANÁLISE DA EXTRUSORA

Para se utilizar uma extrusora monorroscas para a produção de compósito plástico-madeira devem ser observados o diâmetro do funil de alimentação, a geometria da rosca e a existência de um sistema de degasagem.

Além desses pontos, a produção de compósito plástico-madeira em uma extrusora exige uma checagem, antes de iniciar o processamento, de alguns itens como os fios das ligações elétricas; o funcionamento do painel elétrico; funcionamento das bandas de aquecimento e dos termostatos; correto posicionamento dos termômetros; ausência de tela filtrante; aquecimento prévio da extrusora e principalmente da matriz; correto fechamento da matriz, evitando vazamentos; entre outros.

A observação e o monitoramento de todos os pontos citados são importantes para o correto funcionamento da extrusora e evitar os riscos de graves acidentes, como o ocorrido durante a produção dos compósitos plástico-madeira, quando houve uma falha no sistema de aquecimento da matriz (banda de aquecimento), resultando no rompimento de três parafusos (FIGURA 45).

FIGURA 45 – ROMPIMENTO DE PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA MATRIZ DURANTE O PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA DEVIDO FALHA NO SISTEMA DE AQUECIMENTO DA MATRIZ



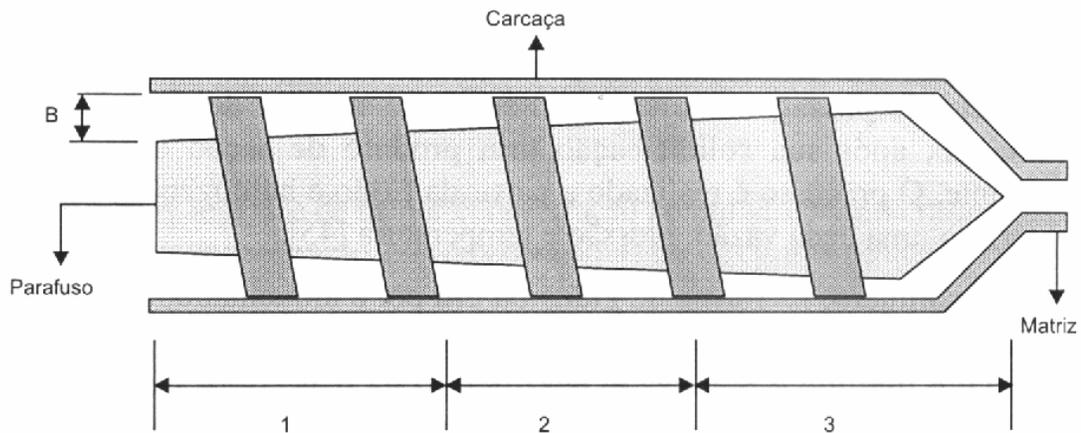
Durante o processamento devem ser monitorados constantemente as temperaturas e a amperagem do motor no painel de controle além do acompanhamento dos itens anteriores (bandas de aquecimento, termostatos etc.) diretamente na extrusora.

#### 5.4.1 Rosca

De acordo com BRETAS e D'AVILA (2000) normalmente, a rosca (ou parafuso) de uma extrusora possui três zonas geometricamente diferentes (FIGURA 46). A seção 1, chamada de zona de alimentação possui canais profundos, ou seja, a altura do filete B é grande. A maior parte da fusão do polímero ocorre na seção 2 ou zona de compressão. A seção 3, zona de dosagem, possui canais rasos, ou seja, B é pequeno. O desenho e as

dimensões da rosca podem variar de acordo com o tipo de polímero a ser processado.

FIGURA 46 – ESQUEMA DA ROSCA DE UMA EXTRUSORA MONORROSCA



A extrusora utilizada nesse estudo tinha a rosca desenhada para processar o PVC. A particularidade é que o PVC, sendo extremamente sensíveis ao calor, não suportam o aquecimento resultante do cisalhamento, por isso, a rosca não apresenta a seção de dosagem. Os canais da extrusora utilizada são profundos ( $B = 10 \text{ mm}$ ).

Essa característica pode ter prejudicado a qualidade do composto plástico-madeira produzido, uma vez que canais mais rasos significam melhores misturas.

#### 5.4.2 Funil de Alimentação

O funil, acoplado à parte traseira do cilindro da extrusora, armazena e entrega a matéria-prima, na forma de pó ou granulado, à zona de alimentação da rosca.

FIGURA 47 – FUNIL DA EXTRUSORA



O diâmetro do funil (= 50 mm) dificultou o fluxo normal dos materiais. Esse diâmetro é considerado muito pequeno para escoar materiais de baixa densidade, como o pó-de-lixia ( $0,14 \text{ g/cm}^3$ ). ENGLISH e FALK (1996) citam que as condições de alimentação dos equipamentos para fabricação de compósitos são seriamente afetadas por materiais com densidade baixa, ou menor que  $0,25 \text{ g/cm}^3$ . A alimentação fica ainda mais prejudicada quando a abertura do funil de alimentação for muito pequena, dificultando o escoamento dos materiais para dentro do cilindro (FIGURA 47).

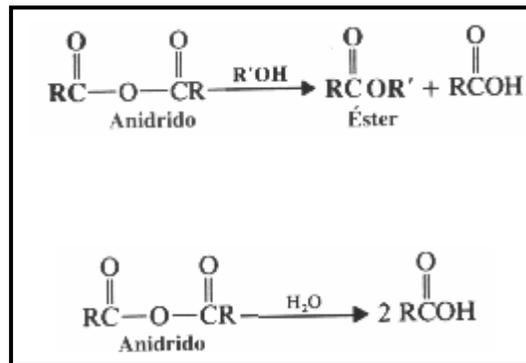
As formulações que continham acima de 20% de pó-de-lixia apresentaram interrupções no processo. E quanto maior o percentual de pó, mais difícil foi o escoamento do material. Para os produtos com serragem o fluxo foi interrompido para as formulações 30S3% (30% de madeira + 3% de anidrido maleico + peróxido) e 30S4% (30% de madeira + 4% de anidrido maleico + peróxido).

### 5.4.3 Sistema de Degasagem

Durante o processo de extrusão dos compósitos plástico-madeira existe uma liberação de gases (vapor de água, voláteis da madeira e gases ácidos) que se acumulam no interior do cilindro da extrusora e que irão ser eliminados juntamente com o extrudado.

A liberação de gases é menor na reciclagem do que na extrusão reativa. Isso sugere que grande parte da reação com o anidrido maleico e o peróxido de dibenzoila (FIGURA 48) ocorreu na primeira extrusão.

FIGURA 48 – PROVÁVEIS REAÇÕES DE ANIDRIDO



FONTE: SOLOMONS (1996)

O anidrido maleico tem o ponto de fusão em 53° C. Com as reações haverá a formação do ácido maleico (HO<sub>2</sub>CCH=CHCO<sub>2</sub>H), que tem o ponto de fusão em 131° C. Como a temperatura de extrusão foi de até 160° C, o ácido maleico, formado no interior da extrusora, será eliminado na forma de gás.

No final das reações há ainda a provável liberação de outros gases como o ácido butanóico e outros ácidos carboxílicos e ainda o vapor de água e outros voláteis da madeira.

Esses gases gerados poderiam, ainda, ser resultantes da degradação térmica da madeira contida nos compósitos. Entretanto, os testes indicam que esses gases não significam uma pirólise da madeira.

KOLLMANN e CÔTÉ (1984) citam que pesquisadores japoneses verificaram que, para a madeira do carvalho, a pirólise da hemicelulose pode ocorrer entre 150 e 180° C e da celulose entre 280 e 350° C. A pirólise da lignina também se inicia a 280° C, atingindo seu máximo entre 350 e 400° C e terminando em 450 a 500° C.

GONZALEZ e MYERS (1993) estudaram o efeito da degradação da madeira nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os autores trabalharam com temperaturas entre 220 e 260° C e tempo de exposição entre 4 e 4096 min. Os autores concluíram que as propriedades dos compósitos foram afetadas para temperaturas de extrusão acima de 250° C.

Para SAHEB e JOG (1999), acima de 200° C a degradação termal das fibras resulta na produção de voláteis que podem interferir nas propriedades dos compósitos.

Ainda que uma seção da extrusora estivesse com uma temperatura de 160° C, isso não significa que possa ter ocorrido a pirólise da hemicelulose, uma vez que o tempo total de residência do material dentro da extrusora foi de aproximadamente 2 minutos. E, conforme mostram os estudos dos autores citados acima, os processos da pirólise da hemicelulose até 200° C são negligenciáveis.

Embora a geração dos gases tenha ocorrido na produção de todos os compósitos plástico-madeira, ela foi maior e melhor percebida na extrusão das formulações que continham anidrido maleico e peróxido de dibenzoila.

Além do maior volume gerado e do forte cheiro, os gases provocaram grande irritação no sistema respiratório e principalmente nos olhos indicando a presença dos gases ácidos.

Como a extrusora utilizada não dispunha de um sistema de degasagem, a quantidade de gás liberado causou interrupções no processo de produção do compósito plástico-madeira e interferiu na qualidade do extrudado.

FIGURA 49 – EXTRUDADO IRREGULAR DEVIDO AOS GASES GERADOS NO INTERIOR DA EXTRUSORA



Houve a produção de um extrudado irregular e apresentando um inchamento na saída da matriz (FIGURA 49).

Esses fenômenos, segundo BRETAS e D'AVILA (2000), são observados na extrusão devido à elasticidade do polímero. Um dos fenômenos é denominado inchamento do extrudado. Esse fenômeno é caracterizado pelo aumento do diâmetro do extrudado em relação ao diâmetro da matriz.

Embora os fenômenos citados ocorram na extrusão de polímeros, a liberação de gases no interior da extrusora contribuiu para aumentar ainda mais a ocorrência desses fenômenos.

#### 5.4.4 Aplicação do Compósito

A produção de objetos, a partir dos compósitos plástico-madeira produzidos nesse estudo, foi possível tanto pelo processo de extrusão como pelo processo de injeção.

A linha de produção (equipamentos) da Escola Tupy, utilizada nesse estudo para a produção dos compósitos plástico-madeira, foi projetada para a produção de tubos plásticos.

FIGURA 50 – TUBOS PRODUZIDOS COM COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA



Assim sendo, durante a extrusão dos compósitos foi possível testar a produção de tubos a base de compósitos plástico-madeira (FIGURA 50) para formulações com 10% de madeira (pó-de-lixia e serragem).

Para as formulações com 30% de madeira, o inchamento do extrudado não permitiu que os tubos passassem pela calibradora, inviabilizando a produção no equipamento utilizado.

FIGURA 51 – VASOS PARA ORQUÍDEAS, INJETADO COM OS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS E RECICLADOS



A produção de vasos para orquídeas (FIGURA 51) foi possível para as três composições testadas 10P2% (10% de pó-de-lixia + 2% anidrido maleico + 0,50% de peróxido de dibenzoila + 87,5%PP); 20P (20% de pó-de-lixia + 80%PP) e o material reciclado 30S3X (30% de serragem com 3 extrusões).

A injetora foi ajustada nas mesmas condições para trabalhar com o polipropileno puro. A temperatura foi de 200° C e a pressão de 115 bar.

A produção dos vasos com a formulação 10P2% não necessitou de nenhum ajuste na injetora para a produção dos vasos.

A formulação contendo 20% de pó-de-lixia necessitou de uma pressão de 125 bar, o que representou um aumento de aproximadamente 10% em relação ao ajuste da pressão para injetar o PP puro.

Já a produção dos vasos, utilizando o compósito reciclado com a formulação com 30% de serragem e com três extrusões (reciclagem), necessitou de 160 bar, ou seja, um aumento na pressão na ordem de 40% em relação às condições iniciais da injetora.

Outro produto também obtido pelo processo de injeção foram as régua escolares. A produção das régua escolares também foi possível para a formulação 30S1% (30% de serragem + 1% de anidrido maleico + 0,25% de peróxido de dibenzoila + 68,75%PP) (FIGURA 52).

FIGURA 52 – RÉGUAS ESCOLARES, INJETADOS COM OS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS



Nessas régua produzidas foi possível observar que o compósito plástico-madeira injetado apresentou uma superfície plana com excelente acabamento. As arestas com pequena espessura (0,5 mm) também não apresentaram problemas no acabamento. Mesmo os detalhes em relevo da marcação dos milímetros na régua não apresentaram qualquer tipo de falha de preenchimento durante o processo de injeção.

Um outro produto testado a partir dos compósitos plástico-madeira produzidos foi obtido pelo processo de extrusão (FIGURA 53) com os compósitos já granulados.

A produção dos perfis extrudados foi possível para a formulação 10PPE (10% de pó-de-lixia + 90%PEBD), produzidas nos testes preliminares; 20P (20% de pó-de-lixia + 80%PP) e o material reciclado 30S3X (30% de serragem + 3 extrusões).

FIGURA 53 – PRODUÇÃO DE PERFIL USANDO COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA EM UMA EXTRUSORA MONORROSCA



Quanto maior a quantidade de madeira nos compósitos, maior foram as dificuldades encontradas para ajustar todos os parâmetros da linha de produção dos perfis.

A dificuldade em ajustar alguns parâmetros resultou em perfis com uma superfície com aspecto áspero. Outra dificuldade encontrada foi o ajuste para a formação da canaleta central. Alguns produtos acabaram ficando maciços sem a formação da canaleta (FIGURA 54).

FIGURA 54 – PERFIS EXTRUDADOS A PARTIR DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS



Os testes realizados mostraram que a produção de perfis extrudados a partir de compósitos plástico-madeira pode ser realizada em uma extrusora monorroscas.

Entretanto, o ajuste de todos os equipamentos da linha de produção para uma produção contínua de um perfil necessita de vários ajustes. Entre os parâmetros a serem ajustados podem ser citados os conjuntos de temperaturas da extrusora, o tipo de rosca, a velocidade de extrusão, a distância do calibrador à matriz, a abertura do calibrador e a velocidade do puxador.

Os testes indicaram que a produção por extrusão de perfis, como as canaletas, a partir de compósitos plástico-madeira, seja mais complicada que a produção de perfis maciços.

A produção de perfis como as canaletas com paredes delgadas exigem um maior cuidado no ajuste dos parâmetros como, por exemplo, a distância da matriz ao calibrador, o sincronismo entre a velocidade da extrusão e a velocidade de tração e a regulagem do sistema de vácuo entre outros.

Essa etapa da aplicação do compósito na produção de um objeto mostrou que os compósitos plástico-madeira podem ser utilizados na fabricação de produtos tanto pelo processo de extrusão como pelo processo de injeção.

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que a metodologia empregada permitiu atender aos objetivos preestabelecidos:

- os resíduos da indústria madeireira puderam ser empregados na produção de compósitos plástico-madeira;
- a produção do compósito plástico-madeira pôde ser realizada em uma extrusora monorroscas. Entretanto, para uma produção em escala industrial, muitos ajustes devem ser feitos, principalmente, nos equipamentos;
- a incorporação de compatibilizante, mesmo com as limitações apresentadas durante a extrusão reativa, resultou em compósitos com melhores propriedades;
- os compósitos produzidos a partir da serragem tiveram melhor desempenho que os produzidos com pó-de-lixas. A granulometria foi importante desde o manuseio do material até a sua extrusão, sendo que as dificuldades para trabalhar com o pó-de-lixas foram maiores;
- o compósito plástico-madeira é reciclável.

Nesse estudo foi possível identificar os problemas durante a produção de compósito plástico-madeira em uma extrusora monorroscas. Com relação às variáveis mais importantes no processo podem ser citadas:

- foi observado que a umidade da madeira tem uma grande interferência no processo de produção dos compósitos plástico-madeira;
- quanto maior o percentual de madeira na formulação dos compósitos, mais difícil foi o processamento, tanto na entrada (funil de alimentação) quanto na saída (matriz). O limite encontrado na produção dos compósitos com compatibilizante (extrusora com  $\phi 60$  mm) foi 30% de madeira. Acima desse valor o processo fica comprometido pela dificuldade de escoamento do material e do volume de gás gerado, que

- causa as interrupções inviabilizando o processo, além do risco de rompimento do cilindro pela pressão dos gases gerada no seu interior;
- a geometria da rosca da extrusora utilizada neste estudo apresentou baixa eficiência para misturar e homogeneizar as fibras de madeira na matriz polimérica;
  - para se trabalhar com extrusão reativa é necessário ter um sistema de refrigeração na boca do funil de alimentação para evitar que haja o início da reação ainda dentro do funil.
  - para se trabalhar com material de baixa densidade aparente, por exemplo, o pó-de-lixo é necessário ter um sistema de alimentação forçada dentro do funil para evitar interrupções no fluxo do material.

## 7 SUGESTÕES

Este estudo procurou demonstrar a possibilidade da produção de compósitos plástico-madeira em uma extrusora monorrosca, a partir de resíduos de madeira. Entretanto, face às limitações observadas, é importante que novos estudos sejam conduzidos, sendo recomendado:

- a produção dos compósitos em uma extrusora com rosca universal e com sistema de degasagem a vácuo, haja vista a importância que a umidade tem no processo;
- usar um homopolímero também na forma de pó para que a mistura polímero/madeira fique mais homogênea;
- testar formulações com percentual de compatibilizante maior que 4%;
- testar outros tipos de peróxidos;
- testar o copolímero pré-preparado (PPMA) na forma de pó;
- revestir a madeira com PPMA para aumentar a dispersão das fibras na matriz de PP e favorecer a adesão na interface fibra/matriz;
- misturar o PP às fibras revestidas com PPMA;
- usar o sistema de refrigeração com água gelada na produção dos compósitos plástico-madeira. Nesse sistema não há a necessidade de imersão do compósito na água, portanto, não há a absorção de água por parte do compósito. E assim, não haveria a necessidade da secagem dos granulados.

## REFERÊNCIAS

- ABDELLAH, A.; UTRACKI, L.A. Interphase and Compatibilization of Polymer Blends. **Polymer Engineering and Science**, v.jun., p.211-19, 1996.
- AKV-TV **Consolidation of Natural Fibre Composite Use in German Automotive Industry**. Disponível em: <<http://www.netcomposites.co.uk/news>> Acesso em: 02 nov. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS PLÁSTICOS COMPOSTOS. **Compósitos**. Disponível em: <<http://www.asplar.org.br/v2/asplar/index.htm>> Acesso em: 25 jan. 2003.
- BARBOSA, L.C.A. **Introdução à Química Orgânica**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- BENDER, D.A.; WOLCOTT, M.P. **Engineered wood-plastic composites**. USA: Washington State University, 2001. Technical Report.
- BITTENCOURT, E. **O poste de plástico**. Disponível em: <<http://www.opopular.globo.com/suplemento>> Acesso em: 04 jun. 2002.
- BLASS, A. **Processamento de polímeros**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1988.
- BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J.; THEIS, S. Wood-filled thermoplastic composites. **Mechanics of Composite Materials**, v.34, n.6, p.795-802, 1998.
- BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v.24, p.221-74, 1999.
- BLEDZKI, A.K.; REIHMANN, S.; GASSAN, J. Thermoplastics reinforced with wood fillers: a literature review. **Polymer-plastic Technology Engineering**, v.37, n.4, p.451-68, 1998.
- 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.
- BRAND, M.A. **Avaliação do balanço de materiais e balanço energético de uma indústria de base florestal**. Curitiba, 2000. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná.
- 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.

BRETAS, R.E.S.; D'AVILA, M.A. **Reologia de polímeros**. São Carlos: Editora da UFSCar, 2000.

BRITISH PLASTICS & RUBBER. **Growth in consumption of extruded wood-plastic composites**. London: MCM Publishing Ltd., v.may, p.26, 2001.

BRITISH PLASTICS & RUBBER. **Plastic-wood extrusion direct from the compounder**. London: MCM Publishing Ltd., v.nov., p.13, 2000.

CANEVAROLO Jr., S.V. **Ciência dos polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

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.

CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Mechanical properties of curaua fiber reinforced polypropylene composites. In: International Symposium on Natural Polymers and Composites - ISNaPol, 2000, São Pedro. **Proceedings...**, São Pedro: Embrapa/USP/Unesp, 2000. p. 450-53(a).

CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Wood flour/polyhydroxybutyrate composites. In: International Symposium on Natural Polymers and Composites - ISNaPol, 2000, São Pedro. **Proceedings...**, São Pedro: Embrapa/USP/Unesp, 2000. p.426-30(b).

CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Woodflour as reinforcement of polypropylene. **Materials Research**, v.5, n.4, p. 405-09, 2002.

CARLTON, J. Wood-plastic. **The Wall Street Journal Americas**. New York, 03 abr. 2000.

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.161-69, 2003.

CORREA, C.A.; FONSECA, C.N.P.; NEVES, S.; RAZZNO, C.A.; HAGE Jr., E. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.13, n.3, p. 154-65, 2003.

COSTA, T.H.S. **Preparação e caracterização de compósitos à base de polipropileno e fibras de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. Tese. (Doutorado em Ciência) Universidade Federal do Rio de Janeiro.

COUTINHO, F.M.B.; COSTA, T.H.S. Performance of polypropylene-wood fiber composites. **Polymer Testing**, v.18, p.581-87, 1999.

COUTINHO, F.M.B.; COSTA, T.H.S.; MELO, D. Compósitos à base de polipropileno e fibras de madeira: Preparação e caracterização. **Anais**, Águas de Lindóia: 5º Congresso Brasileiro de Polímeros, 1999, CD.

COUTO, E.; TAN, I.H.; DEMARQUETTE, N.; CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Oxygen plasma treatment of sisal fibers and polypropylene: effects on mechanical properties of composites. **Polymer Engineering and Science**, v.42, n.4, p.790-97, 2002.

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

DIGABEL, F.L.; BOQUILLON, N.; DOLE, P.; MONTIES, B.; AVEROUS, L. Properties of thermoplastic composites based on wheat-straw lignocellulosic fillers. **Journal of Applied Polymer Science**, v.93, n.1, p.428-36, 2004.

ECKERT, C. H. Market Opportunities for natural fibres in plastics composites. **Proceedings: Wood-Plastic Conference**, p. 87-106, Baltimore, 2000.

EIN, Co.,Ltd. **Environmental Technology for a cleaner earth**. Japan: Ein Engineering Co.,Ltd, 2001. Technical Report.

ENGLISH, B. Wood-filled plastics: an introduction. In: Annual meeting of Window and Door Manufacturers Association, 2000, USA. **Summaries...** Arizona, 2000 (a).

ENGLISH, B. Wood-Plastics Materials and Processes: A Look at Twenty Five Years of Patent Activity. **Proceedings: Wood fiber plastic composites**, p. 189-94, Madison, 1996.

ENGLISH, B.; FALK, R.H. Factors that affect the application of woodfiber-plastic composites. **Proceedings: Wood-Plastic Conference**, p. 60-72, Baltimore, 2000 (b).

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

FELIX, J.M.; GATENHOLM, P. The nature of adhesion in composites of modified cellulose fibers and polypropylene. **Journal of Applied Polymer Science**, v.42, p.609-20, 1991.

FERRO, S. Plástico reciclado ameaça perfis de madeira das obras. **Plástico Moderno**, v.24, n.302, p.26-33, 1999.

FETECH **Category: building materials.** Disponível em:  
<<http://www.fetech.ttnet.net>> Acesso em: 04 set. 2004.

FORLIN, F.S.; FARIA, A.F. Reciclagem de embalagens plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.12, n.1, p.1-10, 2002.

FROLLINI, E.; LEÃO, A. L.; MATTOSO, L.H.C. (Eds) **Natural Polymers and Agrofiber Based Composites.** São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000.

FUAD, M.Y.A.; ZAINI, M.J.; JAMALUDIN, M.; ISHAD, Z.A.M. Determination of filler content in rice husk ash and wood-based composites by thermogravimetric analysis. **Journal of Applied Polymer Science**, v.51, p.1875-82, 1994.

GARDNER, D.J. **Wood plastic extrusion overview.** USA: University of Maine, 2001. Technical Report.

GARDNER, D.J.; O'NEIL, S. **Bonding wood plastic composite lumber.** USA: University of Maine, 2000. Technical Report.

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.sep., p.482-86, 2001.

GONZALEZ, C.; MYERS, G.E. Thermal-degradation of wood fillers at the melt-processing temperatures of wood-plastic composites – effects on wood mechanical-properties and production of volatiles. **International Journal of Polymeric Materials**, v.23, n.1-2, p. 67-85, 1993.

GUADAGNINI, M.A. **Madeiras plásticas como materiais alternativos para madeiras naturais.** Rio de Janeiro, 2001. Dissertação. (Mestrado em Tecnologia em Polímeros) Universidade Federal do Rio de Janeiro.

HAUGHEY, J. Extruder makers fine-tune process equipment. **Modern Plastics**, v.79, n.2, p.51, 2002.

HWANG, T.S.; SHIN, K.S.; LEE, J.T.; YOON, T.H. Effect of coupling agent on the mechanical properties of wood-thermoplastic composites. **Polymer-Korea**, v.23, n.3, p.450-455, 1999.

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, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; THOMAS, S.; PRASANNAKUMARI, L.; KOSHY, P.; PAVITHRAN, C. Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fibre reinforced polymer composites. **European Polymer Journal**, v.32, n.10, p.1243-50, 1996.

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.

KACZMAREK, D.; WORTBERG, J. Extrusão de madeira: uma união promissora entre polímeros e cargas naturais. **Plástico Industrial**, v.jun, p. 40-51, 2004.

KAMDEM, D.P.; JIANG, H.H.; CUI, W.N.; FREED, J.; MATUANA, L.M. Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service. **Composites part A – Applied Science and Manufacturing**, v.35, n.3, p.347-55, 2004.

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

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 vie 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**. New York: Spring-Verlag, 1984 (reprint).

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

LU, J.Z.; WU, Q.; McNABB Jr, H.S. Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: a review of coupling agents and treatments. **Wood and Fiber Science**, v.32, n.1, p.88-104, 2000.

LU, J.Z.; WU, Q.; NEGULESCU, I.I. The influence of maleation on polymer adsorption and fixation, wood surface wettability, and interfacial bonding strength in wood-PVC composites. **Wood and Fiber Science**, v.34, n.3, p.434-459, 2002.

- LU, J.Z.; WU, Q.; NEGULESCU, I.I. Wood-fiber/high-density-polyethylene composites: Compounding process. **Journal of Applied Polymer Science**, v.93, n.6; p.2570-78, 2004.
- MACKENZIE, R.C. **Differential thermal analysis**. New York: Academic Press, 1970.
- MALDAS, D.; KOKTA, B.V. Influence of organic peroxide on the performance of maleic anhydride coated cellulose fiber-filled thermoplastic composites. **Polymer Journal**, v.23, n.10; p.1163-71, 1991.
- MALVAR, L.J.; PENDLETON, D.E.; TICHY, R. Fire issues in engineered wood composites for naval waterfront facilities. **Sampe Journal**, v.37, n.4, p.70-75, 2001.
- MANKOWSKI, M.; MORRELL, J.J. Patterns of fungal attack in wood-plastic composites following exposure in a soil block test. **Wood and Fiber Science**, v.32, n.3, p.340-345, 2000.
- MANO, E. **Reciclagem tecnológica**. Disponível em <<http://www.ufrj.br/materia>> Acesso em: 8 jun 2002.
- MAPLESTON, P. Wood composite suppliers are poised for growth in Europe. **Modern Plastic**, v.oct., p.41, 2001.
- MARCOVICH, N.E.; ARANGUREN, M.I.; REBOREDO, N.M. Some aspects related to the processing of natural fiber-polymer composites. In: International Symposium on Natural Polymers and Composites - ISNaPol, 2002, São Pedro. **Proceedings...**, São Pedro: Embrapa/USP/Unesp, 2002. p. 416-21.
- MARCOVICH, N.E.; REBOREDO, N.M.; ARANGUREN, M.I. Modified woodflour as thermoset fillers. II-Thermal degradation of woodflours and composites. **Thermochimica Acta**, v.372, p.45-57, 2001.
- MASSON, T.J. **Desenvolvimento e reciclagem do polipropileno modificado pela presença de cargas híbridas**. São Paulo, 1998. Tese de Doutorado, Universidade Mackenzie.
- MATTOSO, L.H.C. Conferência internacional de compósitos reforçados com fibras vegetais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.IX, n.2, p.16, 1999.
- MOLINARO, H. All decked out (plastics applications). **Plastic Engineering**, v.59, n.3, p.17(1), 2003.

MUSLICH, M.; NURWATI The possibility of some timber estate wood species for marine construction in Indonesia. In: XI World Forest Congress, 1997, Turkey. **Summaries...** Antalya, v.IV, topic 19, 1997.

NETCOMPOSITES **15% Growth in Wood-Plastic Composite**. Disponível em: <<http://www.netcomposites.co.uk/news>>. Acesso em: 14 jul. 2004.

NOTHENBERG, M. Cresce o interesse pelo uso de fibras naturais. **Anuário Brasileiro do Plástico**, p.6-15, 1996.

OKAMOTO, T. Recent developments in wood-plastic composites – extrusion of wood based materials. **Mokuzai Gakkaishi**, v.49, n.6, p.401-407, 2003.

OLANDOSKI, D.P. **Rendimento, resíduos e considerações sobre melhorias no processo em indústria de chapas compensadas**. Curitiba, 2001. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná.

OPTIMAT; MERL **Wood plastic composites study – Technologies and UK market opportunities**. UK: The Waste and Resources Action Programme, 2003. Technical Report.

PAIVA, J.M.F.; TRINDADE, W.G.; FROLLINI, E. Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçada com fibras vegetais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.out/dez, p.170-76, 1999.

PENDLETON, D.E.; HOFFARD, T.A.; ADCOCK, T.; WOODWARD, B.; WOLCOTT, M.P. Durability of an extruded HDPE/wood composite. **Forest Products Journal**, v.52, n.6, p.21-27, 2002.

PICKERING, K. L.; ABDALLA, A; JI, C.; McDONALD, A. G.; FRANICH, R. A. The effect of silane coupling agents on radiata pine fibre for use in thermoplastic matrix composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.34, n.10, p.915-26, 2003.

PLASTICS TECHNOLOGY. Plastic wood makes good. **Plastic Technology**, v.39, n.3, p.94, 1993.

PROCESS HEATING **Drying Technology: The Last 10 Years**. Disponível em <<http://www.process-heating.com/CDA/ArticleInformation>> Acesso em: 10 set. 2004.

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

RAJ, R.G.; KOKTA, B.V. Compounding of cellulose fibers with polypropylene: effect of fiber treatment on dispersion in the polymer matrix. **Journal of Applied Polymer Science**, v.38, p.1987-96, 1989.

REINFORCED PLASTICS **US demand for composite lumber grows**. Disponível em: <http://www.reinforcedplastic.com/WZ/RPlastics/news>. Acesso em: 14 jul. 2004.

REVISTA DO PLÁSTICO **Chicago mostra os rumos do plástico**. Disponível em: [http://www.plastico.com.br/revista/pm310/npe2000\\_6.htm](http://www.plastico.com.br/revista/pm310/npe2000_6.htm) Acesso em: 04 jun. 2002.

REYNOLDS, T. **Wood Plastic Composites**. UK: Watford, n.211-511, 2004. Technical Report.

ROSE, J. Equipment overcomes some knotty problems. **Modern Plastics**, v.79, n.3, p.40-1, 2002.

ROUT, R.K.; JENA, S.N.; DAS, S.C. Spectral and thermal studies of biomass cured phenolic resin polymers. **Biomass and Bioenergy**, v.25, p.329-34, 2003.

ROZMAN, H.D. The effect of lignin and surface activation on the mechanical properties of rubberwood-polypropylene composites. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v.18, n.4, p.471-490, 1998.

SAHEB, D.N.; JOG, J.P. Natural fiber polymer composites: a review. **Advances in Polymer Technology**, v.18, n.4, p.351-63, 1999.

SANADI, A.R.; CAULFIELD, D.F.; JACOBSON, R.E. **Agro-fiber thermoplastic composites, paper and composites from Agro-Based Resources**. Eds. Rowell, R.M, Young, R.A. e Rowell, J.K. cap.12, p.377-401, Lewis Publishers, 1997.

SANADI, A.R.; JACOBSON, R.E.; CAULFIELD, D.F.; ROWELL, R.M. Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastic. **Industrial Engineering Chemical Research**, v.34, p.1889, 1995.

SANCHES, E.M.S.; FERREIRA, M.M.C.; FELISBERTI, M.I. Avaliação da degradação térmica e fotooxidativa do ABS automotivo. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.out/dez, p.116-22, 1999.

SAPIEHA, S.; PUPO, J.; SCHREIBER, H. Therma degradation of cellulose containing composites during process. **Journal of Applied Polymer Science**, v.37, p.233, 1989.

SATO, S. Engenheiro cria chapas de madeira plástica. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 04 mar. 2000.

SCHUT, J.H. For compounding, sheet & profile, wood is good. **Plastics Technology**, v.45, n.3, p.46(7), 1999.

SELLERS, T.; MILLER, G.D.; KATABIAN, M. Recycled thermoplastics reinforced with renewable lignocellulosic materials. **Forest Products Journal**, v.50, n.5, p.24-28, 2000.

SOLOMONS, T.W.G. **Química orgânica 2**. 6.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1996.

SPECIALCHEM. **Additive developments aid growth in wood-plastic composites**. Disponível em: <<http://www.specialchem4polymers.com>> Acesso em: 13 jun. 2003.

SPECIALCHEM. **Polymerization Initiators**. Disponível em: <<http://www.specialchem4polymers.com>> Acesso em: 17 ago. 2004.

STARK, N. Influence of moisture absorption on mechanical properties of wood flour-polypropylene composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v.14, n.5, p.421-432, 2001.

STARK, N. M.; BERGER, M.J. Effect of particle size on properties of wood-flour reinforced composites. **Proceedings**: Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, p. 134-143, Madison, Wisconsin, 1997.

STARK, N.M. Wood fiber derived from scrap pallets used in polypropylene composites. **Forest Products Journal**, v.49, n.6, p.39-46, 1999.

STARK, N.M.; MATUANA, L.M.; CLEMONS, C.M. Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.93, n.3, p.1021-30, 2004.

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.167-74, 2003.

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.

STOKKE, D.D.; GARDNER, D.J. Fundamental Aspects of Wood as a Component of Thermoplastic Composites. **Journal of Vinyl & Additive Technology**, v.jun., p.112-16, 2003

TAKASE, S.; SHIRAISHI, N. Studies on composites from wood and polypropylenes. **Journal of Applied Polymer Science**, v.37, p.645-59, 1989.

TOMASELLI, I. Mercado e comercialização de madeiras. **Revista da Madeira**, n.38, p.10-16, 1999.

VERHEY, S.A.; LAKS, P.E. Wood particle size affects the decay resistance of woodfiber/thermoplastic composites. **Forest Products Journal**, v.52, n.11/12, p.78-81, 2002.

VIKSNE, A.; RENCE, L.; KALNINS, M.; BLEDZKI, A.K. The effect of paraffin on fiber dispersion and mechanical properties of polyolefin-sawdust composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.93, n.5; p.2385-93, 2004.

WARDEL, C. **Wood notes**. Disponível em: <[http://visitors.handymanclub.com/handy.mag/article\\_06.asp](http://visitors.handymanclub.com/handy.mag/article_06.asp)> Acesso em: 04 jun. 2002.

WELLS, C. **Perfil de recicladora de plástico**. Rio de Janeiro: SEBRAE, 1994. Relatório técnico.

WOLCOTT, M.P. **Wood-plastic composites extrusion**. USA: Washington State University, 2001. Technical Report.

WOLCOTT, M.P.; ENGLUND, K. A technology review for wood-plastic composites. **Proceedings: 33<sup>rd</sup> Intern. Particleboard/Composite Materials Symposium**. USA: Washington State University, 1999.

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

## ANEXOS

## ANEXO 1 – RELAÇÃO COMPLETA E DESCRIÇÃO DE TODOS OS COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS NESSE ESTUDO

## FORMULAÇÕES USADAS NA PRODUÇÃO

PRODUTO		DESCRIÇÃO
1	10S	10% de serragem + 90%PP
2	20S	20% de serragem + 80%PP
3	30S	30% de serragem + 70%PP
4	10S1%	10% de serragem c/ 1% anidrido maleico + 0,25% peróxido de dibenzoila + 88,75%PP
5	30S1%	30% de serragem c/ 1% anidrido maleico + 0,25% peróxido de dibenzoila + 68,75%PP
6	10S2%	10% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,50% peróxido de dibenzoila + 87,50%PP
7	30S2%	30% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,50% peróxido de dibenzoila + 67,50%PP
8	10S3%	10% de serragem c/ 3% anidrido maleico + 0,75% peróxido de dibenzoila + 86,25%PP
9	30S3%	30% de serragem c/ 3% anidrido maleico + 0,75% peróxido de dibenzoila + 66,25%PP
10	10S3%	10% de serragem c/ 4% anidrido maleico + 1,00% peróxido de dibenzoila + 85,00%PP
11	30S3%	30% de serragem c/ 4% anidrido maleico + 1,00% peróxido de dibenzoila + 65,00%PP
12	10P	10% de pó + 90%PP
13	20P	20% de pó + 80%PP
14	30P	30% de pó + 70%PP
15	10P1%	10% de pó c/ 1% de anidrido maleico + 0,25% de peróxido de dibenzoila + 88,75%PP
16	30P1%	30% de pó c/ 1% de anidrido maleico + 0,25% de peróxido de dibenzoila + 68,75%PP
17	10P2%	10% de pó c/ 2% de anidrido maleico + 0,50% de peróxido de dibenzoila + 87,50%PP
18	30P2%	30% de pó c/ 2% de anidrido maleico + 0,50% de peróxido de dibenzoila + 67,50%PP
19	10P3%	10% de pó c/ 3% de anidrido maleico + 0,75% de peróxido de dibenzoila + 86,25%PP
20	30P3%	30% de pó c/ 3% de anidrido maleico + 0,75% de peróxido de dibenzoila + 66,25%PP
21	100%PP	100% polipropileno virgem

## FORMULAÇÕES USADAS NO TESTE PILOTO

	PRODUTO	DESCRIÇÃO
1	10SPE	10% de serragem + 90%PEBD
2	20SPE	20% de serragem + 80%PEBD
3	30SPE	30% de serragem + 70%PEBD
4	40SPE	40% de serragem + 60%PEBD
5	50SPE	50% de serragem + 50%PEBD
6	10PPE	10% de pó-de-lixia + 90%PEBD
7	20PPE	20% de pó-de-lixia + 80%PEBD
8	30PPE	30% de pó-de-lixia + 70%PEBD
9	40PPE	40% de pó-de-lixia + 60%PEBD
10	50PPE	50% de pó-de-lixia + 50%PEBD

## FORMULAÇÕES USADAS NA RECICLAGEM

	PRODUTO	DESCRIÇÃO
1	10S 2X	10% de serragem + 90%PP (2 extrusões)
2	30S 2X	30% de serragem + 70%PP (2 extrusões)
3	10S2% 2X	10% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 87,5%PP (2 extrusões)
4	30S2% 2X	30% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 67,5%PP (2 extrusões)
5	10S 3X	10% de serragem + 90%PP (3 extrusões)
6	30S 3X	30% de serragem + 70%PP (3 extrusões)
7	10S2% 3X	10% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 87,5%PP (3 extrusões)
8	30S2% 3X	30% de serragem c/ 2% anidrido maleico + 0,5% peróxido de dibenzoila + 67,5%PP (3 extrusões)

## ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO POLIPROPILENO UTILIZADO NESSE ESTUDO

### Folha de Dados do Produto

#### Prolen HP 501 K

Homopolímero

##### Descrição

O Prolen HP 501 K é um homopolímero de polipropileno, desenvolvido para moldagem por injeção em geral.

O Prolen HP 501 K oferece realçada estabilidade do processo e estabilidade dimensional das peças injetadas.

- .-Componentes de eletrodomésticos.
- .-Peças industriais como bobinas para têxteis, peças de esteiras, etc.
- .-Pequenas embalagens e brinquedos.
- .-Tampas com dobradiças integradas.
- .-Compostos de PP.

##### Observações

##### Propriedades Valor Típico Unidade Método

##### Físicas

ÍNDICE DE FLUIDEZ 230 °C/2,16 kg 3,5 g/10min ASTM D-1238

DENSIDADE 23 °C 0,905 g/cm<sup>3</sup> ASTM D-792

##### Mecânicas

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO 33 MPa ASTM D-638

ALONGAMENTO NO ESCOAMENTO 13 % ASTM D-638

ALONGAMENTO NA RUPTURA MÍN 50 % ASTM D-638

MÓDULO DE FLEXÃO 1450 MPa ASTM D-790

##### Impacto

RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD @23 °C 43 J/m ASTM D-256

##### Dureza

DUREZA SHORE D 1 s 71 - ASTM D-2240

##### Térmicas

TEMP. DE AMOLECIMENTO VICAT 1 kg 151 °C ASTM D-1525

TEMP. DE DISTORÇÃO TÉRMICA 0,45 MPa 95 °C ASTM D-648

##### Aplicações Típicas

. Os dados acima são valores obtidos nos laboratórios da Polibrasil, de acordo com os métodos citados nas condições estabelecidas pela Norma ASTM D-4101.

. Os valores apresentados correspondem à média dos valores de cada propriedade, e não devem ser considerados como especificação do produto.

. Em outras aplicações a Polibrasil tem resinas desenvolvidas especialmente para atingir propriedades específicas desejadas pelo mercado.

. O Prolen HP 501K atende aos requisitos do Food and Drug Administration (FDA) para contato com alimentos.

. Características de Embalagem: Sacos de 25 kg , Big-Bag ou Granel.

Atenção: As informações contidas nesta folha de produto, bem como quaisquer sugestões e recomendações sobre aplicação de nossos produtos, baseiam-se no melhor de nossos conhecimentos, mas não podem ser tomadas como garantia da Polibrasil Resinas S.A., uma vez que as condições de uso desses e dos produtos finais estão fora de nosso controle. Para cada uso, recomendamos a realização de testes específicos

Resinas S.A., inclusive por infringência de patentes.

ÁREA EMITENTE: GCT / DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

DATA 20/02/2003 REV. 00 / DOCUMENTO EMITIDO / ASSINADO ELETRONICAMENTE

Polibrasil Resinas S.A. – Av. Dr. Chucri Zaidan, 80 11º andar CEP 04583-110 São Paulo –SP – Brasil

Tel. 55 11 3345-5900 Fax. 55 11 3345-5967 / www.polibrasil.com.br

ANEXO 3 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE BARTLETT PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Data file: TRACA0 Title: tracao  
 Function: ANOVA-1 Data case no. 1 to 160  
 One way ANOVA grouped over variable 1 (tratamento) with values from 1 to 16.  
 Variable 6 (valor)

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-value	Prob.
Between	15	610.256	40.684	112.334	0.0000
Within	144	52.152	0.362		
Total	159	662.408			

Coefficient of Variation = 2.33%

Var.	VARIABLE	No. 6			
1	Number	Sum	Average	SD	SE

1	10.00	250.100	25.010	0.72	0.19
2	10.00	275.100	27.510	0.51	0.19
3	10.00	275.300	27.530	0.43	0.19
4	10.00	277.600	27.760	0.53	0.19
5	10.00	212.800	21.280	0.72	0.19
6	10.00	231.400	23.140	0.52	0.19
7	10.00	253.500	25.350	0.59	0.19
8	10.00	242.100	24.210	0.88	0.19
9	10.00	246.200	24.620	0.48	0.19
10	10.00	269.300	26.930	0.39	0.19
11	10.00	280.000	28.000	0.39	0.19
12	10.00	282.200	28.220	0.53	0.19
13	10.00	239.000	23.900	0.88	0.19
14	10.00	250.300	25.030	0.72	0.19
15	10.00	268.500	26.850	0.65	0.19
16	10.00	271.200	27.120	0.32	0.19

Total	160.00	4124.600	25.779	2.04	0.16
Within			0.60		

Bartlett's test

Chi-square = 22.086

Number of Degrees of Freedom = 15 Approximate significance = 0.000

## ANEXO 4 – RESULTADOS DA ANÁLISE FATORIAL PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Data file: TRACA0 Title: tracao  
Function: FACTOR

Experiment Model Number 3: Three Factor Completely Randomized Design

Data case no. 1 to 160.

Factorial ANOVA for the factors:

Replication (Var 2: repeticao) with values from 1 to 10  
Factor A (Var 3: granulometria) with values from 1 to 2  
Factor B (Var 4: %) with values from 1 to 2  
Factor C (Var 5: aditivo) with values from 0 to 3

Variable 6: valor

Grand Mean = 25.779 Grand Sum = 4124.600 Total Count = 160

### TABLE OF MEANS

2	3	4	5	6	Total
*	1	*	*	25.224	2017.900
*	2	*	*	26.334	2106.700
*	*	1	*	26.947	2155.800
*	*	2	*	24.610	1968.800
*	1	1	*	26.952	1078.100
*	1	2	*	23.495	939.800
*	2	1	*	26.943	1077.700
*	2	2	*	25.725	1029.000
*	*	*	0	23.702	948.100
*	*	*	1	25.653	1026.100
*	*	*	2	26.932	1077.300
*	*	*	3	26.827	1073.100
*	1	*	0	23.145	462.900
*	1	*	1	25.325	506.500
*	1	*	2	26.440	528.800
*	1	*	3	25.985	519.700

*	2	*	0	24.260	485.200
*	2	*	1	25.980	519.600
*	2	*	2	27.425	548.500
*	2	*	3	27.670	553.400

---

*	*	1	0	24.815	496.300
*	*	1	1	27.220	544.400
*	*	1	2	27.765	555.300
*	*	1	3	27.990	559.800
*	*	2	0	22.590	451.800
*	*	2	1	24.085	481.700
*	*	2	2	26.100	522.000
*	*	2	3	25.665	513.300

---

*	1	1	0	25.010	250.100
*	1	1	1	27.510	275.100
*	1	1	2	27.530	275.300
*	1	1	3	27.760	277.600
*	1	2	0	21.280	212.800
*	1	2	1	23.140	231.400
*	1	2	2	25.350	253.500
*	1	2	3	24.210	242.100
*	2	1	0	24.620	246.200
*	2	1	1	26.930	269.300
*	2	1	2	28.000	280.000
*	2	1	3	28.220	282.200
*	2	2	0	23.900	239.000
*	2	2	1	25.030	250.300
*	2	2	2	26.850	268.500
*	2	2	3	27.120	271.200

---

## ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

K	Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob
2	Factor A	1	49.284	49.284	136.0810	0.0000
4	Factor B	1	218.556	218.556	603.4687	0.0000
6	AB	1	50.176	50.176	138.5439	0.0000
8	Factor C	3	270.311	90.104	248.7904	0.0000
10	AC	3	5.533	1.844	5.0925	0.0022
12	BC	3	11.011	3.670	10.1341	0.0000
14	ABC	3	5.385	1.795	4.9563	0.0026
-15	Error	144	52.152	0.362		
Total		159	662.408			

ANEXO 5 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE BARTLETT PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO (RECICLAGEM)

Data file: RECICLADOS

Title: tracao para reciclagem

Function: ANOVA-1 Data case no. 1 to 120

One way ANOVA grouped over variable 1 (tratamento) with values from 1 to 12.

Variable 6 (valor)

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-value	Prob.
Between	11	500.234	45.476	157.628	0.0000
Within	108	31.158	0.288		

Total 119 531.392  
Coefficient of Variation = 2.03%

Var. 1	VARIABLE Number	No. 6 Sum	Average	SD	SE
1	10.00	264.400	26.440	0.78	0.17
2	10.00	239.000	23.900	0.62	0.17
3	10.00	280.000	28.000	0.39	0.17
4	10.00	268.100	26.810	0.60	0.17
5	10.00	256.900	25.690	0.67	0.17
6	10.00	230.200	23.020	0.46	0.17
7	10.00	286.400	28.640	0.38	0.17
8	10.00	280.800	28.080	0.34	0.17
9	10.00	265.000	26.500	0.58	0.17
10	10.00	233.400	23.340	0.39	0.17
11	10.00	291.000	29.100	0.66	0.17
12	10.00	285.800	28.580	0.32	0.17
Total	120.00	3181.000	26.508	2.11	0.19
Within			0.54		

Bartlett's test

Chi-square = 16.641

Number of Degrees of Freedom = 11

Approximate significance = 0.000

ANEXO 6 - RESULTADOS DA ANÁLISE FATORIAL PARA OS ENSAIOS DE  
TRAÇÃO (RECICLAGEM)

Data file: RECICLADOS

Title: tracao para reciclagem

Function: FACTOR

Experiment Model Number 3:

Three Factor Completely Randomized Design

Data case no. 1 to 120.

Factorial ANOVA for the factors:

Replication (Var 2: repeticao) with values from 1 to 10

Factor A (Var 3: %) with values from 1 to 2

Factor B (Var 4: aditivo) with values from 1 to 2

Factor C (Var 5: extrusao) with values from 1 to 3

Variable 6: valor

Grand Mean = 26.508 Grand Sum = 3181.000 Total Count = 120

TABLE OF MEANS						
2	3	4	5	6	Total	
*	1	*	*		27.395	1643.700
*	2	*	*		25.622	1537.300
*	*	1	*		24.815	1488.900
*	*	2	*		28.202	1692.100
*	1	1	*		26.210	786.300
*	1	2	*		28.580	857.400
*	2	1	*		23.420	702.600
*	2	2	*		27.823	834.700
*	*	*	1		26.287	1051.500
*	*	*	2		26.357	1054.300
*	*	*	3		26.880	1075.200
*	1	*	1		27.220	544.400
*	1	*	2		27.165	543.300
*	1	*	3		27.800	556.000
*	2	*	1		25.355	507.100
*	2	*	2		25.550	511.000

* 2 * 3	25.960	519.200
-----		
* * 1 1	25.170	503.400
* * 1 2	24.355	487.100
* * 1 3	24.920	498.400
* * 2 1	27.405	548.100
* * 2 2	28.360	567.200
* * 2 3	28.840	576.800
-----		
* 1 1 1	26.440	264.400
* 1 1 2	25.690	256.900
* 1 1 3	26.500	265.000
* 1 2 1	28.000	280.000
* 1 2 2	28.640	286.400
* 1 2 3	29.100	291.000
* 2 1 1	23.900	239.000
* 2 1 2	23.020	230.200
* 2 1 3	23.340	233.400
* 2 2 1	26.810	268.100
* 2 2 2	28.080	280.800
* 2 2 3	28.580	285.800
-----		

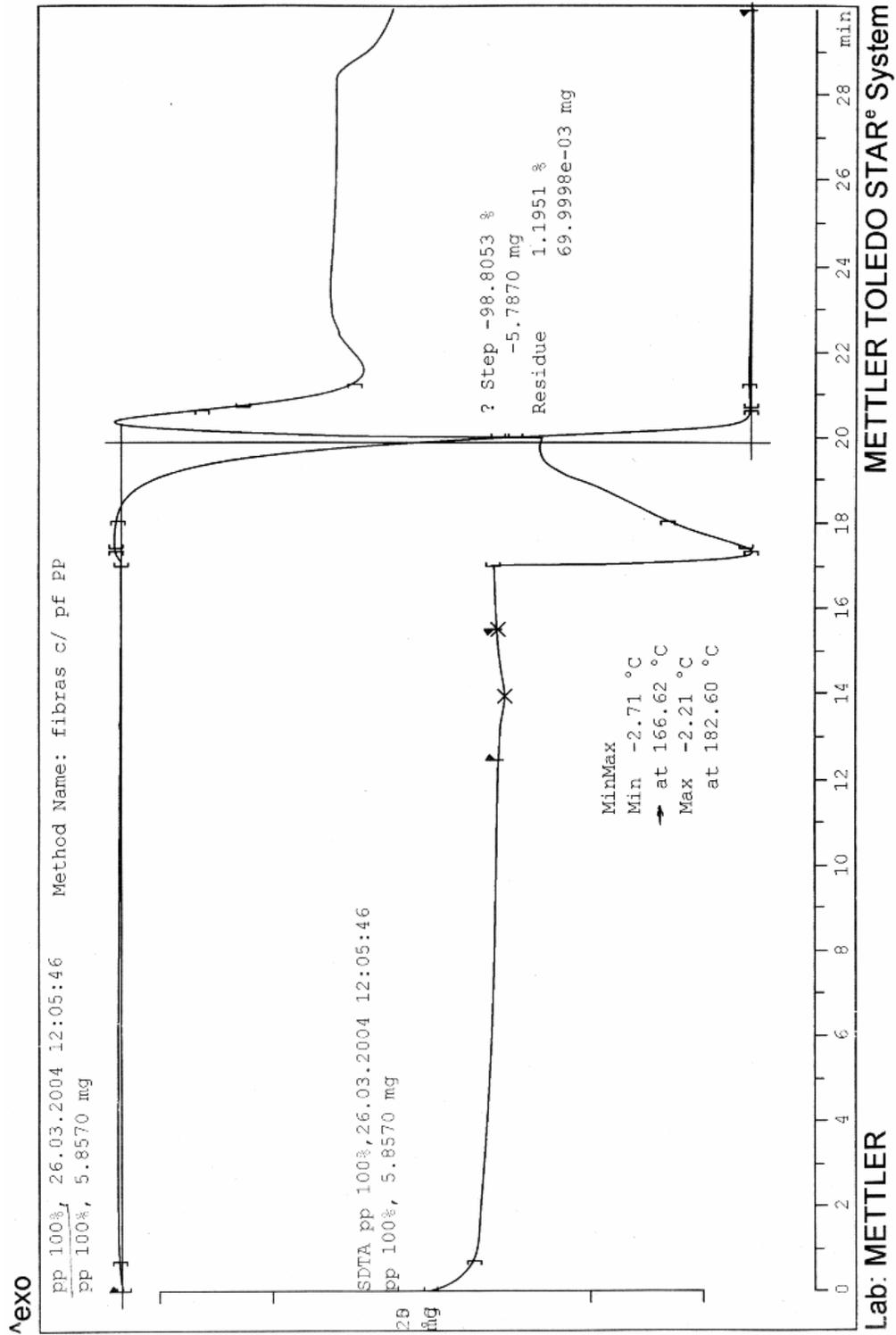
### ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

K Value	Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob
2	Factor A	1	94.341	94.341	327.0064	0.0000
4	Factor B	1	344.085	344.085	1192.6703	0.0000
6	AB	1	31.008	31.008	107.4813	0.0000
8	Factor C	2	8.386	4.193	14.5341	0.0000
10	AC	2	0.379	0.190	0.6571	
12	BC	2	19.931	9.966	34.5427	0.0000
14	ABC	2	2.102	1.051	3.6433	0.0294
-15	Error	108	31.158	0.288		
Total		119	531.392			

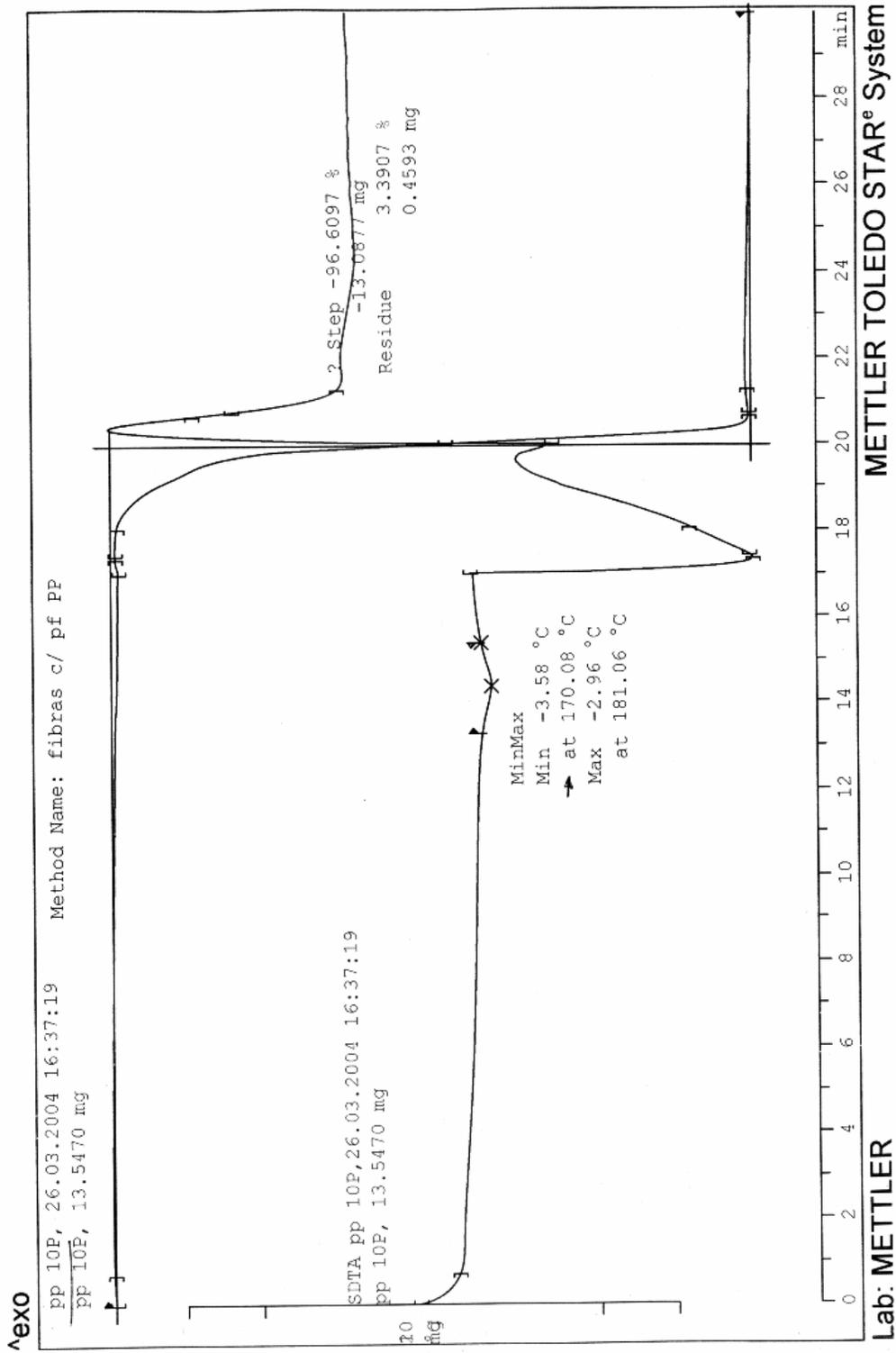
Coefficient of Variation: 2.03%

# ANEXO 7 – RESULTADOS DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

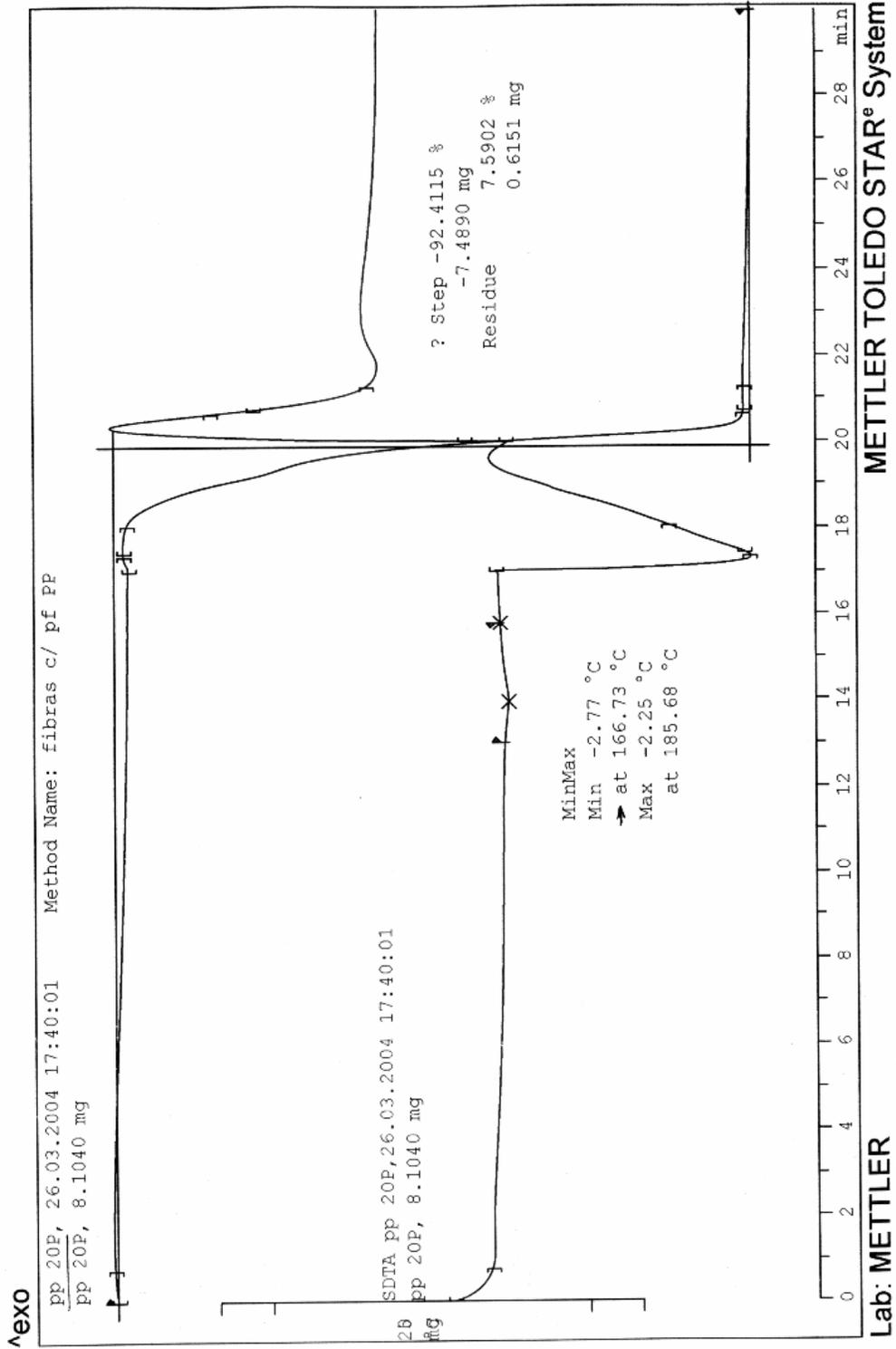
-PP PURO



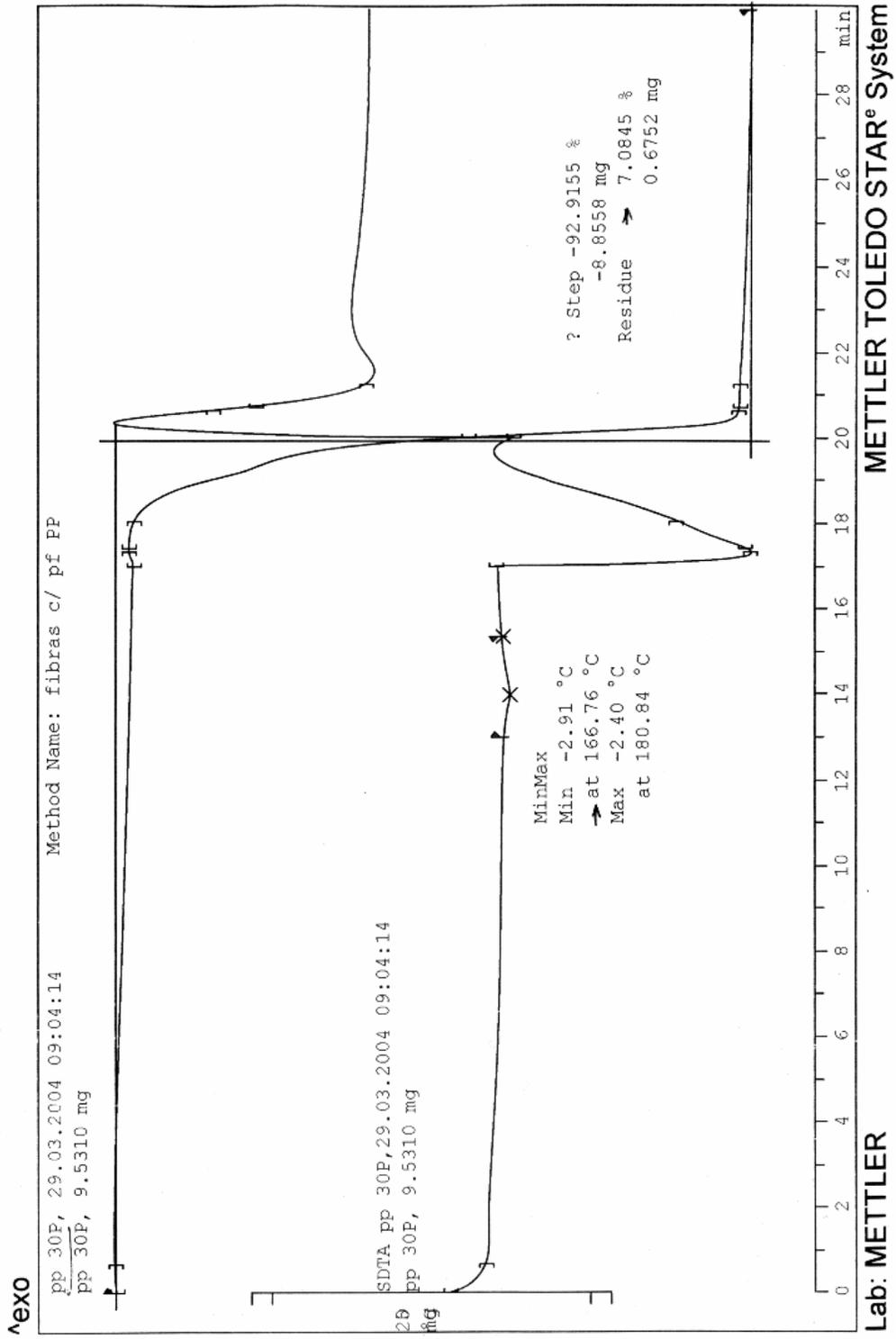
-10% DE PÓ-DE-LIXA



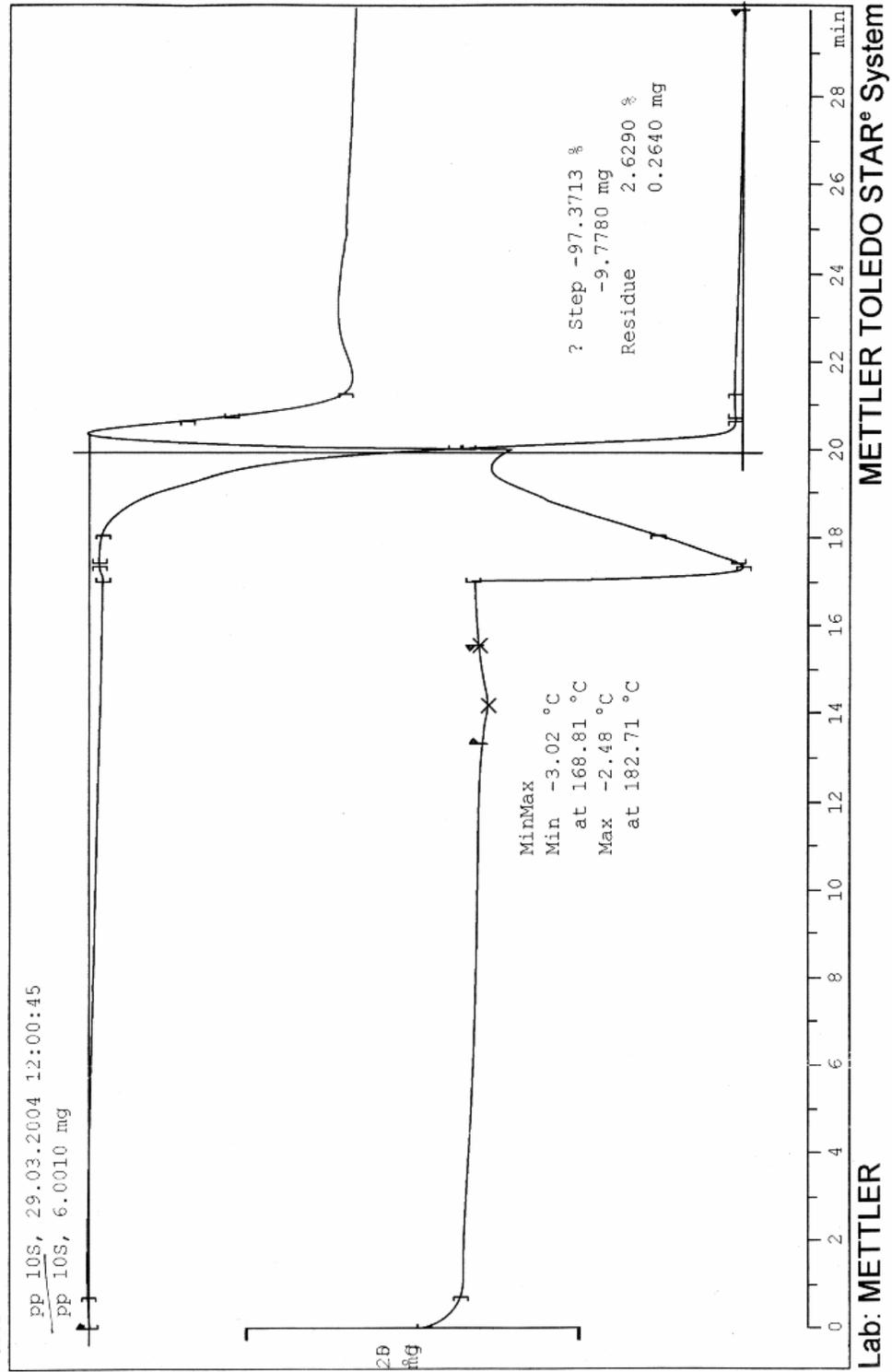
-20% DE PÓ-DE-LIXA



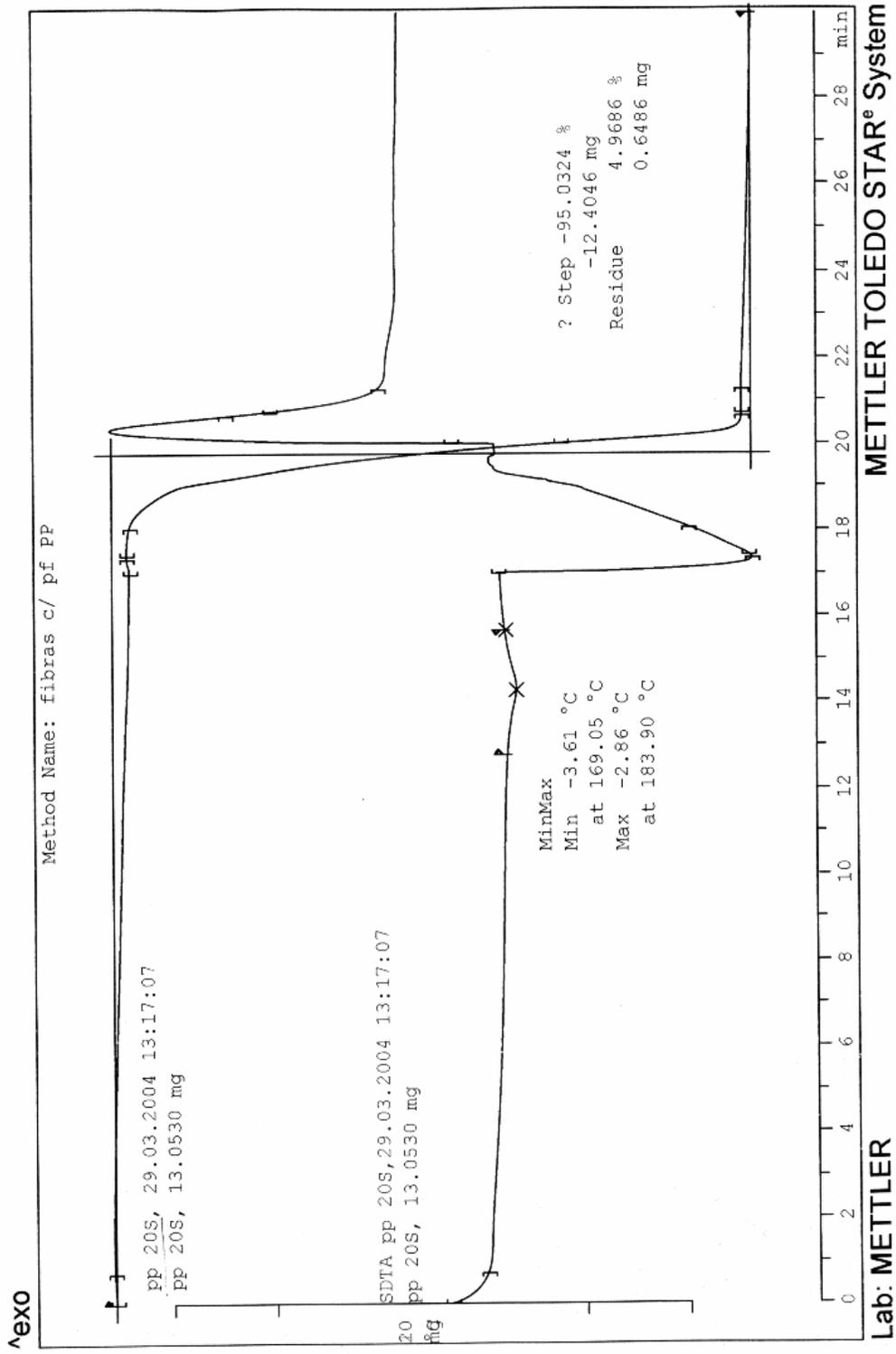
-30% DE PÓ-DE-LIXA



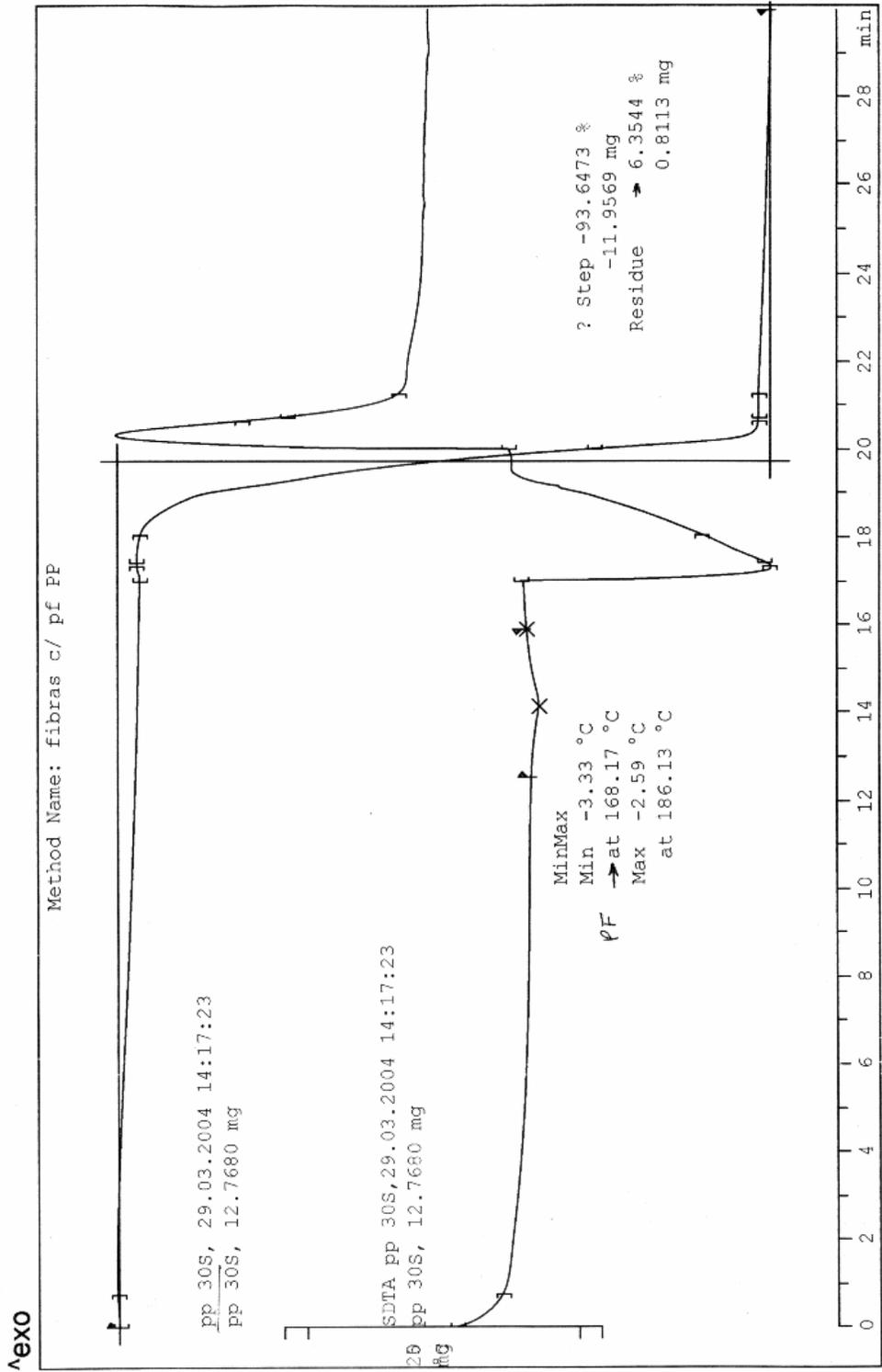
-10% DE SERRAGEM



-20% DE SERRAGEM



-30% DE SERRAGEM



METTLER TOLEDO STAR® System

Lab: METTLER