

ÉVERTON HILLIG

**VIABILIDADE TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIETILENO
(HDPE) REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE MADEIRA E DERIVADOS DAS
INDÚSTRIAS MOVELEIRAS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de “Doutor em Ciências Florestais”, área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Setsuo Iwakiri

Co-Orientadora: Profa. Mara Zeni Andrade

**CURITIBA
2006**

Dedico esse trabalho aos meus pais, Elemar e Loni, cuja determinação indicou-me o caminho a seguir; à minha sogra, Ernestina, cujo vigor inspirou-me a capacidade de persistir; à minha esposa, Susana, cuja beleza e graça mostraram-me o caminho da felicidade; e aos meus filhos, Débora e Gabriel, de cuja ingenuidade e alegria provêm-me a fonte da juventude.

AGRADECIMENTOS

Difícil agradecer todos aqueles que de alguma forma contribuíram para tornar possível essa obra. Gostaria de lembrar aqueles que direta ou indiretamente tiveram participação no desenvolvimento das atividades.

- Ao orientador Prof. Setsuo Iwakiri que, além da orientação, depositou total confiança no sucesso do trabalho;
- Ao co-orientador Prof. Jorge Luis Monteiro de Matos e aos professores Sidon Keinert Junior, Marcio Pereira da Rocha e Vitor Afonso Hoeflich por suas contribuições durante o curso;
- À co-orientadora Prof^a. Mara Zeni por suas contribuições, e por sua persistência no direcionamento do trabalho e na busca da perfeição;
- Aos bolsistas de iniciação científica da Universidade de Caxias do Sul: César Aguzzoli, Karine Grison, Gisele Zanotto, Maicon R. Rizzon, Luis A. Bertotto Filho, Karla Pocai, Mauricio C. Cristani e Otávio Bianchi pelos auxílios prestados em campo ou no laboratório;
- Aos colegas da Universidade de Caxias do Sul, professores Ademir Zattera, Vânia Elisabete Schneider, Luciano Massoco, Estevão Freire, Gláucio de Almeida Carvalho, Rosmary Brandalise, Eloide Teresa Pavoni, Leonardo Canto e Ricardo Oliveira pela convivência e auxílios prestados;
- Aos técnicos de laboratório Jorge Ferreira Gomes e Mayra Finkler pela assistência com as normas e equipamentos;
- Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR, Reinaldo de Mendes de Souza e David Teixeira de Araújo pelo auxílio nas questões administrativas;
- A todos que, anonimamente, deram sua parcela de contribuição ao trabalho e àqueles que representam as diversas empresas e instituições que viabilizaram o desenvolvimento das atividades: UCS, UFPR, Fapergs, CNPq, UFSCar, UFRGS, Peretto Mat. Construção, Plastnew, Única Termoplásticos, Ipiranga Petroquímica.

BIOGRAFIA

Éverton Hillig nasceu em Porto Alegre, em 29 de dezembro de 1963, filho de Elemar Hillig e Loni Vera Hillig. Em 1986 graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria. Trabalhou em diversas empresas como Cimento e Mineração Bagé, Ipiranga Florestal Ltda e Hércules S/A. Ingressou no Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Maria em 1998 e concluiu o mestrado em Engenharia Florestal em 2001. Em 2002 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná como aluno de doutorado. Desde 2001 até hoje, é Professor Adjunto da Universidade de Caxias do Sul, onde atua também como coordenador do Colegiado do Curso de Tecnologia em Produção Moveleira e como pesquisador junto ao Grupo de Pesquisa em Polímeros e ao Instituto de Saneamento Ambiental.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SIGLAS	xv
LISTA DE SIGLAS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 A CADEIA PRODUTIVA DE MADEIRA E MÓVEIS	5
2.2 RESÍDUOS DE MADEIRA DA CADEIA PRODUTIVA DE MADEIRA E MÓVEIS	7
2.2.1 Resíduos de Madeira da Indústria de Lâminas e Compensados	8
2.2.2 Resíduos de Madeira das Serrarias	9
2.2.3 Resíduos de Madeira da Indústria Moveleira	10
2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS	14
2.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CELULÓSICAS	17
2.5 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM MADEIRA	21
2.5.1 Resíduos de Madeira como Matéria-Prima para Compósitos	23
2.5.2 Compósitos de HDPE Reforçados com Resíduos de Madeira	24
2.6 TRATAMENTOS QUÍMICOS E AGENTES COMPATIBILIZANTES	26
2.7 CRISTALINIDADE DA MATRIZ POLIMÉRICA	31
2.7.1 Índice de Cristalinidade	31
2.7.2 Cristalinidade Relativa	32
2.8 PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM MADEIRA	33
2.8.1 Principais Processos de Preparação e Moldagem	33
2.8.2 Processo de Preparação por Extrusão	35
2.9 RECICLAGEM DE POLÍMEROS	36
2.10 APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS COM MADEIRA	38
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 FLUXOGRAMA DE TRABALHO	43
3.2 DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO PÓLO MOVELEIRO	45
3.2.1 Quantidade de Resíduo de Madeira e Derivados Disponíveis	45
3.2.2 Estimativa da Quantidade de Resíduo de Madeira e Derivados Gerados, em Função das Variáveis de Produção	45
3.3 MATERIAIS	46
3.3.1 Materiais Utilizados para Confecção dos Compósitos em Misturador Termocinético (Drais)	46
3.3.2 Materiais Utilizados para Produção do Polietileno de Alta Densidade Graftizado (g-HDPE) em Laboratório	48
3.3.2 Materiais Utilizados para Confecção dos Compósitos em Extrusora	49
3.3.3 Caracterização dos Diferentes Tipos de Serragem Utilizadas nos Experimentos	52
3.3.3.1 Caracterização granulométrica	52

3.3.3.2	Análise termogravimétrica	52
3.3.3.3	Calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	52
3.4	PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS POLÍMERO-MADEIRA	53
3.4.1	Produção dos Compósitos Polímero-Madeira com Misturador Termocinético Tipo Drais	53
3.4.2	Produção dos Compósitos Polímero-Madeira por Extrusão.....	55
3.5	CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS	59
3.5.1	Confecção dos Corpos-de-Prova	59
3.5.2	Caracterização e Ensaio Físico-Mecânicos dos Corpos-de-Prova Confeccionados com Misturador Termocinético (Drais).....	60
3.5.3	Caracterização e Ensaio Físico-Mecânicos dos Corpos-de-Prova Confeccionados com Misturas Extrusadas	62
3.6	MODELOS EXPERIMENTAIS	62
3.6.1	Experimentos com Misturador Termocinético	63
3.6.2	Experimento com Misturas Extrusadas	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO PÓLO MOVELEIRO	67
4.1.1	Estimativa da Quantidade de Serragem Gerada por Município	67
4.1.2	Modelos para Estimativa da Geração de Resíduos em Função das Variáveis de Produção	67
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS SERRAGENS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS	76
4.2.1	Análise Granulométrica	76
4.2.2	Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivativa (DTG)	77
4.3	EXPERIMENTOS COM MISTURADOR TERMOCINÉTICO TIPO DRAIS	84
4.3.1	Modelagem de Misturas de r-HDPE, v-HDPE e Serragem de <i>Pinus taeda</i>	84
4.3.2	Uso de Agentes de Acoplamento nos Compósitos (Experimento II).....	89
4.3.3	Propriedades de Compósitos Confeccionados com r-HDPE e Diferentes Tipos de Serragem de Madeira e Derivado, com Misturador Tipo Drais.....	95
4.3.3.1	Densidade das placas	100
4.3.3.2	Resistência à tração	103
4.3.3.3	Propriedades de flexão estática	106
4.3.3.4	Resistência ao impacto	110
4.3.3.5	Dureza.....	113
4.4	EXPERIMENTO COM MISTURAS EXTRUSADAS	115
4.4.1	Cristalinidade dos Compósitos Extrusados	115
4.4.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	121
4.4.3	Propriedades Físico-Mecânicas dos Compósitos Fabricados com Misturas Extrusadas	125
4.4.3.1	Densidade dos compósitos extrusados	129
4.4.3.2	Resistência à tração dos compósitos extrusados.....	134
4.4.3.4	Resistência à flexão dos compósitos extrusados	143
4.4.3.5	Alongamento à flexão dos compósitos extrusados	149
4.4.3.6	MOE à flexão dos compósitos extrusados	151
4.4.3.7	Resistência ao impacto dos compósitos extrusados	153
4.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS	157
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	166
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
	ANEXOS	181

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- SISTEMA INDUSTRIAL DE BASE FLORESTAL.....	6
FIGURA 2	- SUBSISTEMA DA INDÚSTRIA MOVELEIRA.....	7
FIGURA 3	- DESTINO DO RESÍDUO DE MADEIRA E DERIVADO DAS INDÚSTRIAS DO PÓLO MOVELEIRO DA SERRA GAÚCHA.....	13
FIGURA 4	- CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS SEGUNDO O MATERIAL DE REFORÇO USADO.....	15
FIGURA 5	- CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS SEGUNDO A MORFOLOGIA DA FASE DISPERSA.....	16
FIGURA 6	- MESA E BANCO FABRICADOS COM MADEIRA PLÁSTICA NA FAZENDA ESPERANÇA.....	41
FIGURA 7	- FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DESENVOLVIDAS PARA O TRABALHO.....	44
FIGURA 8	- ESTRUTURA QUÍMICA DO PERÓXIDO DE DICUMILA.....	49
FIGURA 9	- MOINHO DE MARTELOS UTILIZADO PARA GERAÇÃO DE “SERRAGEM” DE MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> E DE CHAPAS AGLOMERADAS.....	50
FIGURA 10	- MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS EM MISTURADOR TERMOCINÉTICO E EXTRUSORAS.....	51
FIGURA 11	- MISTURADOR TERMOCINÉTICO TIPO DRAIS COM DETALHE DA CÂMARA DE MISTURA.....	53
FIGURA 12	- PRENSA SCHULZ COM MOLDE DE 150 X 150 X 3 mm, PARA CONFECÇÃO DAS PLACAS (EXPERIMENTOS I E II).....	54
FIGURA 13	- PRENSA HIDRÁULICA ADAPTADA PARA Prensagem DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS, COM MOLDE DE 150 X 150 X 3 mm (EXPERIMENTO III).....	54
FIGURA 14	- FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS POR EXTRUSÃO.....	55
FIGURA 15	- EXTRUSORA MONO-ROSCA, MARCA SEIBT, UTILIZADA PARA MISTURA DOS COMPÓSITOS.....	56
FIGURA 16	- PERFIL DA ROSCA UTILIZADA NA EXTRUSÃO COM MONO- ROSCA.....	56
FIGURA 17	- EXTRUSORA DUPLA-ROSCA, BAKER & PERKINS, UTILIZADA PARA MISTURA DOS COMPÓSITOS.....	57
FIGURA 18	- PERFIL DA ROSCA UTILIZADA NA EXTRUSÃO COM DUPLA ROSCA.....	57
FIGURA 19	- INJETORA HIMACO UTILIZADA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA POR INJEÇÃO.....	58
FIGURA 20	- CORPOS-DE-PROVA DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À FLEXÃO OBTIDOS POR INJEÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	60
FIGURA 21	- QUANTIDADE DE RESÍDUO DE MADEIRA (A) E DE MDF (B), EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE MATÉRIA-PRIMA CONSUMIDA, COM A LINHA DE REGRESSÃO LINEAR AJUSTADA POR MUNICÍPIO.....	74

FIGURA 22 - QUANTIDADE DE RESÍDUO DE AGLOMERADO (A) E DE COMPENSADO (B), EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE MATÉRIA-PRIMA CONSUMIDA, COM A LINHA DE REGRESSÃO LINEAR AJUSTADA POR MUNICÍPIO	75
FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO TAMANHO MÉDIO DAS PARTÍCULAS, DOS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGENS USADAS NOS EXPERIMENTOS	76
FIGURA 24 - TGA DAS AMOSTRAS DOS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS	78
FIGURA 25 - DTG DAS AMOSTRAS DOS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS	79
FIGURA 26 - CURVAS DE TGA, DTG E DE GAUSS PARA CADA TIPO DE SERRAGEM DE MADEIRA.....	81
FIGURA 27 - TERMOGRAMAS DE DSC PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGENS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS.....	83
FIGURA 28 - GRÁFICO TERNÁRIO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa) DOS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECICLADO) E SERRAGEM DE PINUS	86
FIGURA 29 - GRÁFICO TERNÁRIO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa) DOS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECICLADO) E SERRAGEM DE PINUS	87
FIGURA 30 - RESISTÊNCIA AO IMPACTO (J/m) (A) E DUREZA SHORE A (B) EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECICLADO) E SERRAGEM DE PINUS	88
FIGURA 31 - GRÁFICO TERNÁRIO DA DENSIDADE (g/cm^3) DOS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECICLADO) E SERRAGEM DE PINUS	89
FIGURA 32 - VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA UM DOS AGENTES DE ACOPLAMENTO UTILIZADOS.....	91
FIGURA 33 - VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA UM DOS AGENTES DE ACOPLAMENTO UTILIZADOS	92
FIGURA 34 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS COMPÓSITOS, CONFECCIONADOS COM OS DOIS DIFERENTES TIPOS DE AGENTES DE ACOPLAMENTO E SEM AGENTE.	94
FIGURA 35 - DENSIDADE DAS PLACAS CONFECCIONADAS EM DRAIS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM, PARA CADA TIPO DE SERRAGEM.....	101
FIGURA 36 - VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE DAS PLACAS CONFECCIONADAS EM DRAIS E AMPLITUDE DE VALORES PARA CADA TIPO E PROPORÇÃO DE SERRAGEM	102
FIGURA 37 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS	104
FIGURA 38 - VALORES MÉDIOS E AMPLITUDE DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA CADA TIPO DE SERRAGEM USADA EM MISTURADOR DRAIS.....	105

FIGURA 39 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM, PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS	107
FIGURA 40 - MOE À FLEXÃO ESTÁTICA EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS	108
FIGURA 41 - RESISTÊNCIA AO IMPACTO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS	111
FIGURA 42 - VALORES DE DUREZA EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM, PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADO EM MISTURADOR DRAIS	113
FIGURA 43 - VALORES MÉDIOS DE DUREZA DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS EM DRAIS E AMPLITUDE DE VALORES PARA CADA TIPO E PROPORÇÃO DE SERRAGEM	115
FIGURA 44 - TERMOGRAMAS DE DSC DESLOCADOS VERTICALMENTE POR UM FATOR DE ESCALA ARBITRÁRIO, PARA AS AMOSTRAS COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE PREPARADAS EM EXTRUSORA MONO ROSCA: (A) CRISTALIZAÇÃO, (B) SEGUNDA FUSÃO	117
FIGURA 45 - TERMOGRAMAS DE DSC DESLOCADOS VERTICALMENTE POR UM FATOR DE ESCALA ARBITRÁRIO, PARA AS AMOSTRAS COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE PREPARADAS EM EXTRUSORA DUPLA ROSCA: (A) CRISTALIZAÇÃO, (B) SEGUNDA FUSÃO	118
FIGURA 46 - CRISTALINIDADE RELATIVA PARA OS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS EM EXTRUSORA MONO ROSCA, COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE	119
FIGURA 47 - CRISTALINIDADE RELATIVA PARA OS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS EM EXTRUSORA DUPLA ROSCA, COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE	120
FIGURA 48 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS COM MONO E DUPLA ROSCA E DIFERENTES PROPORÇÕES DE SERRAGEM DE EUCALIPTO, MDF E PINUS	122
FIGURA 49 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS COM MONO E DUPLA ROSCA E DIFERENTES PROPORÇÕES DE SERRAGEM DE PINUS, MDF E AGLOMERADO	124
FIGURA 50 - DENSIDADE DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA	130
FIGURA 51 - VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE DOS COMPÓSITOS E AMPLITUDE DE VARIAÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS POR TIPO DE SERRAGEM	131
FIGURA 52 - MÉDIA E AMPLITUDE DOS VALORES DE DENSIDADE PARA DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM USADOS, NAS	

	PROPORÇÕES DE 20% E 30%, SEPARADOS POR TIPO DE PROCESSO EMPREGADO.....	133
FIGURA 53 -	DENSIDADE DOS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO EMPREGADO, INDEPENDENTE DO TIPO DE SERRAGEM.....	134
FIGURA 54 -	MÉDIAS E AMPLITUDES DE VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS OBSERVADOS POR TIPO DE SERRAGEM.....	135
FIGURA 55 -	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA.....	137
FIGURA 56 -	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO EMPREGADO.....	141
FIGURA 57 -	MÉDIAS E AMPLITUDES DE VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS POR TIPO DE SERRAGEM E PROCESSO EMPREGADO PARA 20 E 30% DE EUCALIPTO, MDF E PINUS.....	142
FIGURA 58 -	RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA.....	144
FIGURA 59 -	RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO EMPREGADO.....	145
FIGURA 60 -	MÉDIAS E AMPLITUDES DE VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS POR TIPO DE PROCESSO E SERRAGEM USADOS.....	146
FIGURA 61 -	RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA DENSIDADE, SEPARADOS POR TIPO DE SERRAGEM E PROCESSO.....	147
FIGURA 62 -	RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM E DO PROCESSO EMPREGADO PARA CADA TIPO DE SERRAGEM USADA NOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS.....	148
FIGURA 63 -	ALONGAMENTO À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO USADO.....	150
FIGURA 64 -	MÉDIA E AMPLITUDE VALORES DE ALONGAMENTO À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS POR TIPO DE PROCESSO E SERRAGEM USADOS.....	150
FIGURA 65 -	MOE À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA CONSIDERANDO APENAS O PROCESSO COM MONO ROSCA.....	153
FIGURA 66 -	RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM E DO PROCESSO USADO PARA CADA TIPO DE SERRAGEM.....	156

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- PERDAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DO COMPENSADO, ESTRATIFICADO POR TAMANHO DA EMPRESA..	8
TABELA 2	- MATÉRIAS-PRIMAS, MADEIRA E DERIVADOS, CONSUMIDAS PELAS EMPRESAS AMOSTRADAS E MÉDIAS PROPORCIONAIS DE APROVEITAMENTO	11
TABELA 3	- QUANTIDADES DE RESÍDUOS DE MADEIRA E DERIVADOS GERADOS NAS EMPRESAS VISITADAS.....	12
TABELA 4	- ESTIMATIVA DOS VOLUMES MENSAIS DOS RESÍDUOS GERADOS POR CLASSE DE MATÉRIA-PRIMA E POR MUNICÍPIO NAS EMPRESAS VISITADAS.....	12
TABELA 5	- PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO FABRICADOS PELA PLASTNEW INDÚSTRIA DE PLÁSTICOS LTDA	40
TABELA 6	- PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO v-HDPE UTILIZADO PARA CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	47
TABELA 7	- PROPRIEDADES FÍSICAS DO POLYBOND 3009.....	48
TABELA 8	- PROPRIEDADES DO ANIDRIDO MALEICO (AM).....	48
TABELA 9	- PROPRIEDADES DO PERÓXIDO DE DICUMILA	49
TABELA 10	- PARÂMETROS DE INJEÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	58
TABELA 11	- CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE r-HDPE, v-HDPE E SERRAGEM DE <i>Pinus taeda</i> USADAS NO EXPERIMENTO I.....	63
TABELA 12	- CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE R-HDPE, SERRAGEM DE <i>Pinus taeda</i> , g-HDPE E POLYBOND USADAS NO EXPERIMENTO II	64
TABELA 13	- CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE r-HDPE, E DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM USADAS NO EXPERIMENTO III	65
TABELA 14	- CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE v-HDPE E DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM, POR DOIS PROCESSOS DE EXTRUSÃO MAIS A INJEÇÃO DE v-HDPE PURO, USADOS NO EXPERIMENTO IV.....	66
TABELA 15	- QUANTIDADE MENSAL ESTIMADA DE SERRAGEM GERADA PELA INDÚSTRIA MOVELEIRA EM CADA UM DOS MUNICÍPIOS PESQUISADOS	67
TABELA 16	- VARIÂNCIA TOTAL EXPLICADA POR CADA UM DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DERIVADOS DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS	68
TABELA 17	- CARREGAMENTOS ESTIMADOS DE CADA VARIÁVEL SELECIONADA EM CADA UM DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDOS.....	69
TABELA 18	- MODELOS PARA ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA E DE SEUS DERIVADOS, OBTIDOS PELO MÉTODO STEPWISE DE REGRESSÃO LINEAR	71

TABELA 19 - REGRESSÃO LINEAR DA ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA E DE SEUS DERIVADOS EM FUNÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA CONSUMIDA PARA CADA MUNICÍPIO.....	73
TABELA 20 - PERDAS DE MASSA E TP PARA OS DIFERENTES TIPOS DE MADEIRA.....	82
TABELA 21 - MASSA RESIDUAL E TEMPERATURA INICIAL (TI) DOS MAIORES ESTÁGIOS DE PERDA DE MASSA	82
TABELA 22 - VALORES DE ENTALPIA E TEMPERATURA DE PICO.....	84
TABELA 23 - RESULTADOS MÉDIOS DOS ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS DOS CORPOS DE PROVA CONFECCIONADOS NA MODELAGEM DE MISTURAS (EXPERIMENTO I)	84
TABELA 24 - EQUAÇÕES SIMPLIFICADAS PARA A DENSIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS CHAPAS, UTILIZANDO-SE APENAS OS COEFICIENTES SIGNIFICATIVOS PELO TESTE “t” ...	85
TABELA 25- VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À FLEXÃO DAS PLACAS COM AS DIFERENTES MISTURAS DE SERRAGEM DE PINUS, r-HDPE E AGENTES DE ACOPLAMENTO	90
TABELA 26 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS PLACAS COM DIFERENTES TIPOS DE AGENTE DE ACOPLAMENTO E PROPORÇÕES DE SERRAGEM.....	90
TABELA 27 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS PLACAS COM DIFERENTES TIPOS DE AGENTE DE ACOPLAMENTO E PROPORÇÕES DE SERRAGEM.....	90
TABELA 28 - VALORES MÉDIOS DAS PRÓPRIEDADES MECÂNICAS DAS PLACAS CONFECCIONADAS COM DIFERENTES TIPOS E PROPORÇÕES DE SERRAGEM EM MISTURADOR TERMOCINÉTICO TIPO DRAIS	96
TABELA 29 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DAS PLACAS CONFECCIONADAS COM DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM EM MISTURADOR TIPO DRAIS.....	99
TABELA 30 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA DENSIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO EXPERIMENTO COM DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM EM MISTURADOR TIPO DRAIS	100
TABELA 31 - MÉDIAS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO, ALONGAMENTO E MOE, OBTIDAS PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM USADOS NO EXPERIMENTO COM MISTURADOR DRAIS.....	109
TABELA 32 - VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM E PROPORÇÕES DE SERRAGEM UTILIZADOS EM DRAIS.....	111
TABELA 33 - VALORES DE ENTALPIA E DE TEMPERATURA PARA A PRIMEIRA FUSÃO, SEGUNDA FUSÃO E CRISTALIZAÇÃO, DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE EM EXTRUSORAS MONO E DUPLA ROSCA	116
TABELA 34 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS, CONFECCIONADOS COM DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM E DOIS TIPOS DE EXTRUSORAS, E A PROPORÇÃO DE SERRAGEM	126

TABELA 35 - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DENSIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA DAS DIFERENTES MISTURAS DE SERRAGEM/v-HDPE CONFECCIONADOS COM MONO E DUPLA ROSCA	127
TABELA 36 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DE DENSIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO EXPERIMENTO COM DIFERENTES TIPOS E PROPORÇÕES DE SERRAGEM EM EXTRUSORAS	129
TABELA 37 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA OBTIDOS POR INJEÇÃO DAS MISTURAS EXTRUSADAS, PARA OS FATORES ESTUDADOS E INTERAÇÃO ENTRE ELES.	129

LISTA DE SIGLAS

ABS	- Acrylonitrile Butadiene Styrene (acrilonitrila-butadieno-estireno)
AERT	- Advance Environmental Recycling Technologies
AM	- Anidrido maleico
ANOVA	- Análise de variância
ASTM	- American Society for Testing and Materials
ATH	- Alumina trihidratada
BNDES	- Banco Nacional de Desenvolvimento
CCA	- Cromo-cobre-arsênico
CGI	- Centro Gestor de Inovação
CNC	- Controle numérico computadorizado
CV	- Coeficiente de variação
DRAIS	- Misturador termocinético
DSC	- Differential scanning calorimetry (Calorimetria diferencial de varredura)
DTG	- Termogravimetria derivativa
E	- Módulo de elasticidade em tração
EVOH	- Ethylene vinyl alcohol copolymer
FAO	- Food and Agriculture Organization
FIERGS	- Fundação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul
HALS	- Hindered amine light stabilizers
HDPE	- High density polyethylene (polietileno de alta densidade)
g-HDPE	- Polietileno de alta densidade graftizado (em laboratório)
r-HDPE	- Polietileno de alta densidade reciclado
v-HDPE	- Polietileno de alta densidade virgem
HIPS	- High impact polystyrene (polietileno de alto impacto)
IBQP	- Instituto Brasileiro da Qualidade e Produtividade
LDPE	- Low density polyethylene (polietileno de baixa densidade)
LMFI	- Low melt flow index (baixo índice de fluidez)
MAH-PP	- Maleic anhydride polypropylene (polipropileno - anidrido maleico)

MAPP	- Maleated polypropylene
MDF	- Medium density fiberboard (chapas de fibras de média densidade)
MFI	- Melt flow index (índice de fluidez)
MMFI	- Medium melt flow index (médio índice de fluidez)
MOE	- Módulo de elasticidade em flexão estática
MOR	- Módulo de ruptura em flexão estática
MOVERGS	- Associação da Indústria de Móveis do Rio Grande do Sul
NMT	- Naturfasermattenverstärker (colchão reforçado de fibras naturais)
PD	- Peróxido de dicumila
PE	- Polyethylene (polietileno)
PP	- Polypropylene (polipropileno)
PS	- Polystyrene (poliestireno)
PVC	- Poly vinyl chloride (poli cloreto de vinila)
SEM	- Scanning Electron Microscopy (microscopia eletrônica de varredura)
SINDIMADEIRA	- Sindicato da Indústria da Madeira de Caxias do Sul
SINDMOVEIS	- Sindicato das Indústrias da Construção e do Mobiliário de Bento Gonçalves
SPSS	- Statistical Package for the Social Sciences
TGA	- Thermogravimetric analysis (Análise termogravimétrica)
UVA	- Ultraviolet absorbers (absorventes ultravioleta)
WPC	- Wood polymer composite (compósito polímero-madeira)
XLPE	- HDPE graftizado com <i>vinyltrimethoxy silane</i>

RESUMO

Este trabalho teve por objetivos analisar os parâmetros de produção de compósitos poliméricos reforçados com resíduos de diferentes tipos de madeiras e de seus derivados, gerados no pólo moveleiro da serra Gaúcha. Inicialmente foi realizado o diagnóstico da geração de resíduos do pólo moveleiro, que incluiu os municípios de Bento Gonçalves, Caxias do Sul, Flores da Cunha e Lagoa Vermelha. Com materiais das indústrias foram realizados três experimentos de incorporação dos resíduos em compósitos com polietileno de alta densidade (HDPE), processados em misturador termocinético tipo Drais e um experimento de incorporação dos resíduos por extrusão. Foi analisada a qualidade das misturas realizadas com HDPE virgem e HDPE reciclado, a eficácia da utilização de agentes de acoplamento e a influência de três diferentes tipos de resíduo nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos. Utilizou-se serragem de madeiras de pinus (*Pinus taeda*) e de Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), e também serragem de chapas de fibra de média densidade (MDF). No experimento com misturas extrusadas, foi utilizada serragem de madeiras de eucalipto (*Eucalyptus grandis*), de pinus, de MDF e de chapas aglomeradas, combinadas com HDPE virgem. As misturas foram processadas em dois tipos de extrusoras: uma mono-rosca de 35 mm, com 150 rpm de rotação e outra dupla-rosca, co-rotante, de 30 mm. Após a mistura, foram confeccionados corpos-de-prova por injeção. Juntamente com o tipo de serragem, foram testadas diferentes proporções de serragem e os dois tipos de extrusão, num experimento fatorial incompleto que totalizou 16 tratamentos. Para avaliação das propriedades do material, foram realizados ensaios mecânicos de tração, flexão estática e impacto, além de análises de caracterização química e física dos compósitos. Os resultados mostraram influência de todos os parâmetros analisados nas propriedades dos compósitos. O uso de HDPE reciclado não afetou a qualidade dos compósitos quando comparado ao HDPE virgem e o uso de um agente de acoplamento comercial melhorou principalmente as propriedades de resistência à tração e à flexão. O tipo de serragem, utilizando-se misturador termocinético, mostrou influência significativa na densidade, na resistência à tração e na resistência à flexão

das placas. A proporção de serragem influenciou os valores médios de densidade e de módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática. Nesse experimento, o MOE melhor expressa as propriedades de flexão do que a resistência máxima. Houve a formação de bolhas na prensagem que provocou a porosidade das placas, afetando as propriedades de tração e de flexão estática, principalmente nos compósitos confeccionados com garapeira. Nos compósitos confeccionados por extrusão, a serragem agiu como carga de reforço e agente nucleante. A proporção de serragem apresentou correlação significativa com todas as propriedades mecânicas e com a densidade dos corpos-de-prova. Dessa forma, foi considerado como parâmetro de importância na determinação das propriedades dos compósitos HDPE/madeira. Houve melhor adesão entre fibra e matriz nos compósitos confeccionados por extrusão em relação aos confeccionados em misturador termocinético. Nesse experimento, a resistência à tração e a resistência à flexão foram influenciadas por todos os parâmetros estudados e as interações com todas as variáveis foram significativas. Numa análise geral, os melhores resultados foram obtidos com processo de dupla-rosca e para as maiores proporções de serragem usadas. A serragem de MDF proporcionou as maiores médias e a de pinus as menores médias de propriedades mecânicas dos compósitos. O tipo de serragem mostrou interações com o processo empregado e com a proporção usada. Confirmou-se a viabilidade técnica de utilização dos resíduos da indústria moveleira na produção de compósitos polímero-madeira, sendo que o controle do tipo de serragem é fundamental para a qualidade do produto final.

Palavras-chave: compósitos, polietileno, resíduos de madeira, compósitos de madeira

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the production variables of polymeric composites reinforced with different type of wood and wood composites residues, generated by the furniture industries of Serra Gaúcha. Firstly, a diagnostic of wood residues generation was performed in the cities of Bento Gonçalves, Caxias do Sul, Flores da Cunha and Lagoa Vermelha. Three experiments of residue incorporations in composites with polyethylene were done with material supplied by the furniture industries (processed with a Drais mixer). The quality of the mixtures done with virgin and recycled HDPE, the efficacy of coupling agents and the influence of three different types of residues in the physical-mechanical properties of composites were analyzed. Wood sawdust of *Pinus taeda* and *Apuleia leiocarpa*, as well as medium density fiberboard (MDF) sawdust were utilized. Finally, a main experiment for the analysis of variables that influence extrusion process was performed. In this experiment, sawdust of *Eucaliptus grandis* and *Pinus taeda* wood was used with HDPE. It was also used MDF and particleboard sawdust. The mixtures were processed in two types of extruders: a 35mm single-screw, with rotation of 150 rpm and a co-rotational 30mm double-screw. After mixing, test specimens were injection molded. Four types of sawdust in proportions of 20, 30 and 40% and two processing methods were tested, in an incomplete factorial experiment that totalized 16 treatments. For material properties evaluation, mechanical tests of tensile strength, flexural strength and impact resistance were done, as well as composites chemical and physical characterization. The results showed influence of all analyzed variables in composites properties. The use of recycled HDPE did not affected composites quality, and the use of a commercial coupling agent improved tensile and flexural strength properties. The use of different types of sawdust in Drais mixer showed significant influence in density, tensile and flexural strength of the specimens. Sawdust proportion influenced average values of density and flexural modulus. In this experiment, elastic modulus expressed flexural properties in a better way than ultimate strength. There was the formation of bubbles in the pressing that caused increase in the porosity of the composite, affecting the tensile and flexural

properties, mainly in the composites confectioned with *Apuleia leiocarpa* wood. In composites manufactured by extrusion, sawdust acted as a reinforcement filler and nucleation agent. The sawdust proportion showed significant correlation with all mechanical properties and with density of test specimens. Therefore, it was considered as parameter of importance in the determination of the composites HDPE/wood properties. There was better filler-matrix adhesion in composites fabricated by extrusion in relation to the confectioned in the Drais mixer. In this experiment, tensile and flexural strength were influenced by all studied variables and all interactions between variables were significant. In a general analysis, best results were obtained in double-screw extrusion process and for higher proportions of sawdust. MDF sawdust resulted in the largest while pine sawdust, the lowest mechanical properties values of the composites. The type of sawdust showed interaction with the process and proportion employed. It was confirmed the technical viability of furniture industry residue utilization in the production of wood-polymer composites. The control of sawdust type is fundamental for final product quality, being its choice dependent on the desirable quality and availability.

Key-words: composites, polyethylene, wood residues, wood composites

1 INTRODUÇÃO

Compósitos com polímeros termoplásticos tem tido especial interesse desde a última década, principalmente no Brasil, quando a indústria dos plásticos obteve avanços expressivos em mercado e tecnologia. A indústria madeireira também apresentou crescimento e novos investimentos. Dentro deste contexto estão inseridos os compósitos polímero-madeira, que podem ser produzidos com fibras, com partículas, com serragem ou com pó de madeira.

Existem diferentes definições para o termo compósito, dependendo do autor e de sua área de pesquisa. CALLISTER (2002) considera que um compósito deve ser um material multifase, com propriedades superiores a cada fase de sua composição. TITA (1999) refere-se aos compósitos como materiais constituídos de um ou mais materiais dispersos numa matriz, chamados de reforço ou carga. Segundo ASTM (2001), compósito é uma mistura física, de dois ou mais materiais combinados para formar um novo material de engenharia. Nesse conceito estariam englobados também como compósitos os painéis de madeira, embora alguns autores prefiram separá-los dos demais tipos.

Para compósito polímero-madeira, o conceito de Tita aplica-se com melhor propriedade, tendo em vista que a madeira seria a fase de reforço ou carga, dispersa numa matriz termoplástica. Não obstante, existe confusão no uso dos termos *woodfiber* e *woodflour*. Segundo RATNER et al (1996), fibras se diferenciam de partículas por apresentarem uma razão de aspecto, que é a relação entre a maior e menor dimensão do corpo, menor que três.

Compósitos termoplásticos com madeira já são produzidos industrialmente em diversas partes do mundo, mas ainda carecem de confiança do mercado brasileiro. Por ser um produto relativamente novo e devido à característica de admitir composições diversas, ainda não se tem no Brasil um produto fabricado a partir de um compósito polímero-madeira que seja largamente utilizado na indústria moveleira ou construção civil.

Autores como ROWEL (1997), LEÃO (1998) e GURRAM (2002) afirmam que a utilização de materiais ligno-celulósicos em compósitos poliméricos traz vantagens

como redução do peso, melhoria das propriedades de resistência à flexão e outras. Por outro lado, tratando-se de fonte natural renovável, contribui para economia de recursos naturais esgotáveis.

Existem diversos processos para fabricação de compósitos polímero-madeira e podem ser divididos em processos de mistura e processos de conformação. Para mistura, os equipamentos mais usados são a extrusora, mono ou dupla-rosca, e o misturador termocinético. Para conformação do produto final, são freqüentemente utilizadas as injetoras e as prensas. SAHEB & JOG (1999) ressaltam que o processo mais utilizado na mistura de compósitos polímero-madeira é a extrusão com dupla-rosca, seguida de injeção para conformação do produto final. Poucos trabalhos, no entanto, se dedicam a estudar e comparar a eficiência dos diferentes processos usados.

Na fase de matriz, segundo RAJ et al. (1989), os polímeros mais utilizados para fabricação de compósitos polímero-madeira são as poliolefinas polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno de baixa densidade (LDPE), de característica apolar. Como a madeira é um material de característica polar, o que diminui sua interação com o polímero, se faz necessária a presença de um agente de acoplamento, para melhorar a interação entre a matriz polimérica e o agregado.

Estudos da interação entre lignina e celulose, em compósitos lignocelulósicos naturais, têm demonstrado ser a primeira responsável pelo arranjo ordenado e arquitetônico das cadeias dos polissacarídeos constituintes. Esse fato, conduz a tese de que a interação entre polímero e madeira, em compósitos com polímeros sintéticos, pode ser melhorada pelo controle das variáveis da madeira utilizada como, por exemplo, espécie de madeira, teor de lignina, modificação química da celulose e outras.

De outro lado, a cadeia produtiva madeira e móveis gera uma significativa quantidade de resíduos de madeira que, embora muitas vezes seja aproveitada para alguns fins específicos, pode se constituir num problema de gestão ambiental das empresas. Embora seja conhecido que a maior perda de madeira na forma de resíduo ocorra em seu processamento primário, sabe-se também que ocorrem perdas nas operações de corte e de acabamento nas indústrias de móveis.

Segundo MORAES (2002), a indústria de móveis pode ser segmentada em função da matéria-prima que utiliza ou do uso final dos móveis que produz. Como existem diferentes tipos de matérias-primas a base de madeira, e diferentes tipos de móveis são produzidos, as empresas moveleiras apresentam diferentes características e produzem diferentes resíduos de madeira e de seus derivados. Em geral, esses resíduos se apresentam na forma de serragem e de retalhos e seu aproveitamento tem sido principalmente para geração de energia.

No Estado do Rio Grande do Sul, a indústria moveleira tem uma expressiva participação na economia, principalmente na região da serra Gaúcha. Conforme Roese (2000), embora no conjunto da indústria de transformação a participação do setor seja modesta, o fato de constituir pólos regionais faz com que assuma grande importância em determinadas regiões. A indústria moveleira Gaúcha está concentrada na região da serra com um pólo em Bento Gonçalves, responsável por 45% da produção estadual. A madeira oriunda de reflorestamentos e os painéis de madeira são os principais produtos utilizados na fabricação e, apesar da alta tecnologia empregada, as perdas ainda são altas, principalmente decorrentes dos cortes primários dos painéis e das operações de beneficiamento da madeira serrada.

Sendo assim, uma alternativa para utilização dos resíduos de madeira e de seus derivados é sua utilização em compósito polímero-madeira. A análise da viabilidade de utilização dos resíduos de madeira e de seus derivados na confecção desses compósitos deve considerar as características do resíduo utilizado. Entre essas diferentes características, a espécie de madeira ou tipo de derivado de madeira utilizado pode influenciar nas propriedades do produto final, dependendo também das proporções utilizadas, dos agentes de acoplamento, do tipo de polímero e do processo empregado.

Esse trabalho teve por objetivo caracterizar os diferentes tipos de resíduos de madeira e de seus derivados gerados na indústria moveleira da serra Gaúcha, assim como estudar a possibilidade de sua utilização em compósitos com HDPE. Objetivou-se, também, mostrar que esses resíduos podem ser usados como reforço nos compósitos, ao invés de serem apenas carga.

Objetivo geral:

O objetivo do presente trabalho consistiu em avaliar a viabilidade técnica de utilização dos resíduos de madeira e de seus derivados, gerados na indústria moveleira, na fabricação de compósitos poliméricos com polietileno de alta densidade (HDPE).

Objetivos específicos:

- com base nos dados obtidos em diagnóstico prévio, determinar os tipos e quantidade de resíduos disponíveis para utilização em compósitos polímero-madeira;
- utilizar modelos matemáticos para estimar a geração de resíduos de madeira em função de variáveis de produção;
- determinar os principais parâmetros necessários à confecção de compósitos poliméricos com resíduos de madeira, tais como: proporção e tipo de serragem, e uso de agentes de acoplamento;
- Analisar as propriedades dos compósitos fabricados pelo processo de mistura termocinética/prensagem e pelo processo de extrusão/injeção;
- Estudar a influência do uso de extrusora mono-rosca e dupla-rosca;
- analisar a influência do uso de diferentes tipos de resíduos de madeira e derivados nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos;
- comparar as propriedades mecânicas dos compósitos confeccionados pelos diferentes processos utilizados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CADEIA PRODUTIVA DE MADEIRA E MÓVEIS

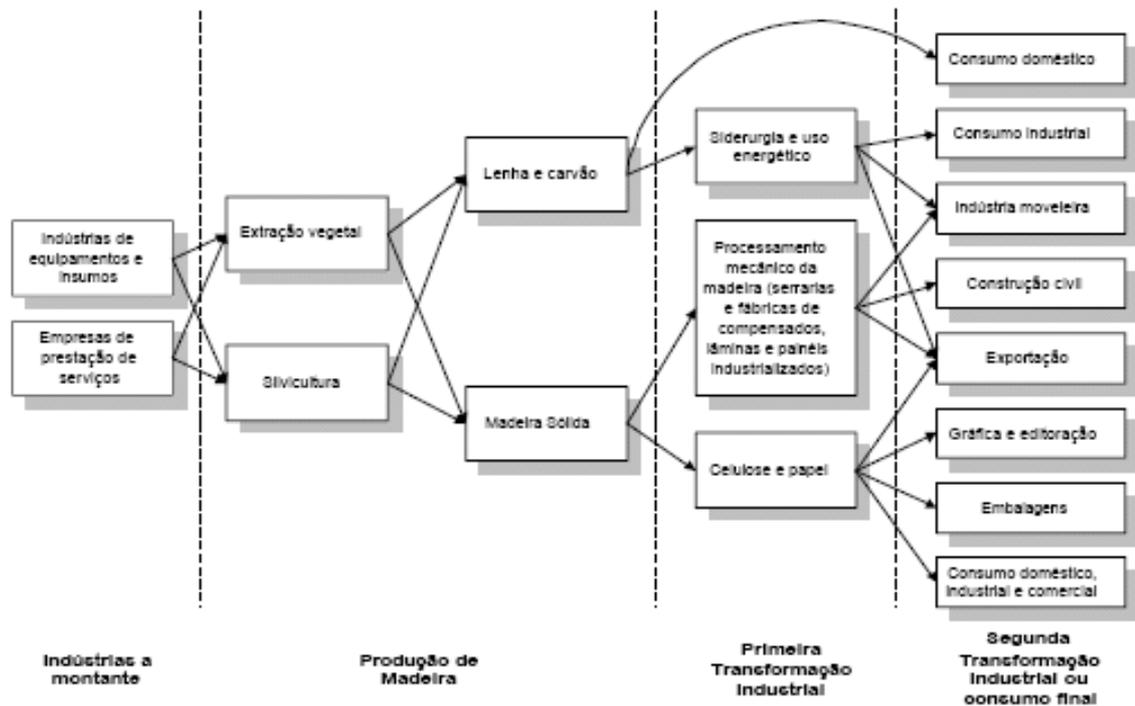
Segundo GUÉRON & GARRIDO (2004) a indústria de madeira e móveis deve ser entendida como parte do setor de base florestal, que compreende, dentre outros, o segmento de papel e celulose e de lenha e carvão vegetal. A partir de um primeiro processo de transformação industrial, a indústria da madeira pode ser desdobrada em indústrias de serrados, painéis de madeira reconstituída, remanufaturados e a indústria de móveis. Esta última compreende um segundo processo de beneficiamento, originando produtos de maior valor agregado.

De acordo com IBQP (2002), a cadeia produtiva da madeira pode ser segmentada em três grandes vertentes, se considerados os distintos usos finais, a cadeia do processamento mecânico, a do papel e celulose e a da energia, representada pela lenha e carvão vegetal. A cadeia de processamento mecânico caracteriza-se pela utilização da madeira bruta e a aplicação de processos mecânicos para seu desdobramento em três tipos básicos, que podem ser definidos como laminação, produção de painéis e desdobro de toras.

Considerando a Cadeia de Processamento Mecânico, GONÇALVES (2000) classificou os processos de usinagem da madeira em abate, descascamento, desdobro, laminação, produção de partículas e beneficiamento. Cada um desses processos é formado por diversas operações, as quais definem o trabalho de transformação da forma da madeira num determinado processo, como por exemplo as operações de corte, seja com uma serra de fita na serraria ou com uma seccionadora na indústria de móveis seriados.

Segundo MORAES (2002) o sistema industrial de base florestal possui quatro segmentos principais que se dividem conforme demonstrado na Figura 1. Dentro dele situa-se o subsistema da indústria moveleira, o qual é responsável pela segunda transformação industrial da madeira.

FIGURA 1 - SISTEMA INDUSTRIAL DE BASE FLORESTAL

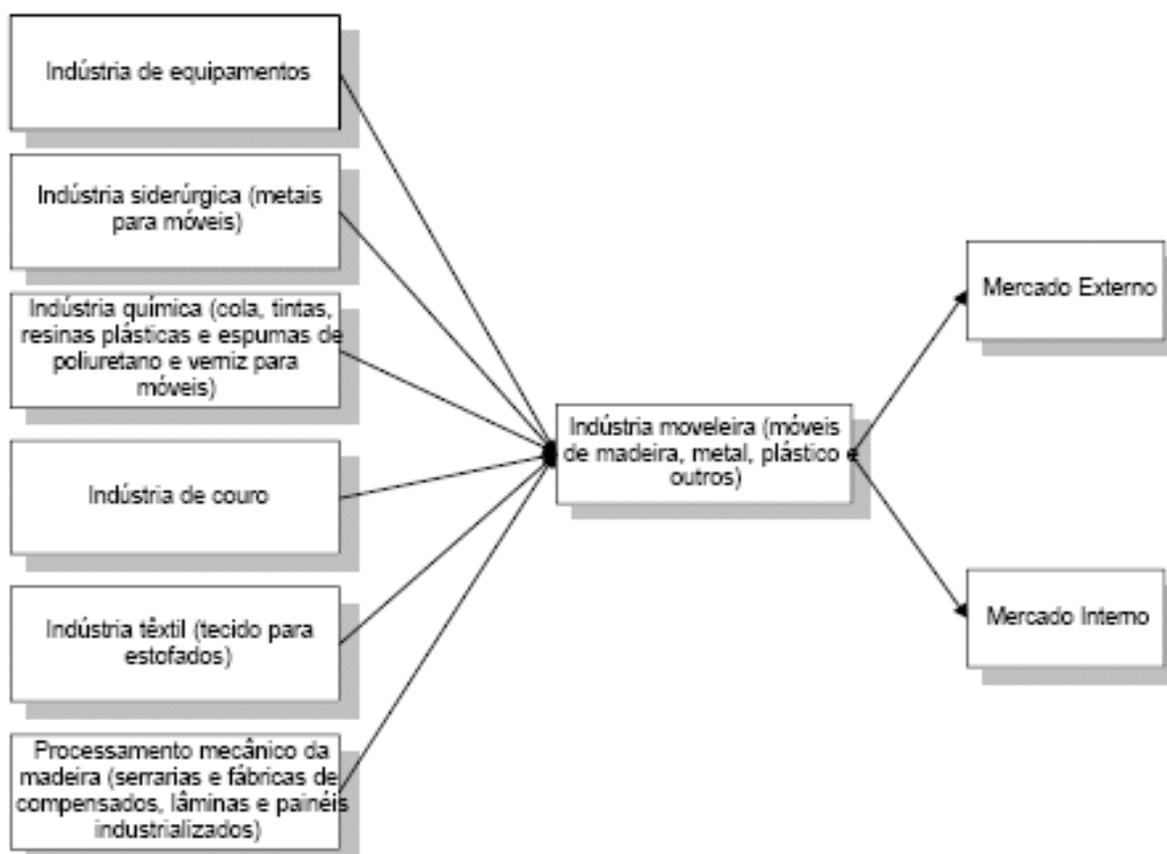


Fonte: Moraes (2002)

MORAES (2002) citou que a indústria moveleira pode ser segmentada tanto em função dos materiais que os móveis são confeccionados, como também de acordo com os usos a que se destinam. Quanto aos usos, existem os móveis de madeira para residência (que contemplam os móveis retilíneos seriados, os móveis torneados seriados e móveis sob medida) e os móveis para escritório (móveis sob encomenda e móveis seriados).

O mesmo autor salienta que o subsistema da indústria moveleira depende, a montante, da indústria siderúrgica, fornecedora de metais para móveis, da indústria química, fornecedora de colas, tintas, PVC, vernizes e vidro, da indústria de couro, indústria têxtil e da indústria responsável pelo processamento da madeira. Desses grupos, entretanto, o do processamento mecânico da madeira fornece a parcela mais significativa de insumos que acabarão por gerar resíduos sólidos. A Figura 2 apresenta o subsistema da indústria moveleira.

FIGURA 2 - SUBSISTEMA DA INDÚSTRIA MOVELEIRA



FONTE: MORAES (2002)

2.2 RESÍDUOS DE MADEIRA DA CADEIA PRODUTIVA DE MADEIRA E MÓVEIS

BRAND & HASSEGAWA (2005), num trabalho para determinação da quantidade de resíduos madeiráveis gerados nas indústrias madeireiras em um raio de 150 km do município de Otacílio Costa, verificaram que os resíduos gerados em maior quantidade pelas empresas da região são: cavaco com casca, resíduos de lâminas, serragem e rolo-resto. As atividades com maior representação na produção de resíduos são as serrarias e laminadoras, que se constituem em indústrias de transformação primária da madeira e que produzem em torno de 80% do volume total de resíduos.

A indústria de lâminas de madeira e do compensado também tem como base toras provenientes de florestas naturais ou de florestas plantadas. Da mesma

forma que no caso da madeira serrada, é necessário uma boa qualidade em relação às propriedades físico-mecânicas da madeira e das dimensões das toras. Nesse segmento, os resíduos resultantes podem alcançar mais de 50% do volume das toras que lhes deram origem (RADIOBRÁS, 1997).

2.2.1 Resíduos de Madeira da Indústria de Lâminas e Compensados

Segundo FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO (1968), citado por SILVA (1987), para a fabricação de 1 m³ de lâminas são necessárias 1,9 m³ de toras de madeira, perfazendo um aproveitamento de 52,6%. Para cada 1 m³ de compensados, considerando toda cadeia produtiva desse segmento industrial, necessita-se de 2,3 m³ de toras de madeira, o que resulta num aproveitamento de 43,5%.

OLANDOSKI (2001) ressalta que as fontes de resíduos no processo de fabricação do compensado podem estar atreladas à qualidade das lâminas, ao processo produtivo como um todo, às características do equipamento e ao comprometimento do operador com a operação. Dessa forma, são essas as principais variáveis que devem ser levadas em consideração quando da caracterização dos resíduos.

Segundo POLZL (2002), a geração de resíduo na fabricação do compensado atingiu a média de 14,07%, considerando os desperdícios depois da secagem das lâminas. A perda de insumos durante o processo produtivo de fabricação de compensados, estratificada por tamanho da empresa, proposta pelo autor é apresentada na Tabela 1.

TABELA 1- PERDAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DO COMPENSADO, ESTRATIFICADO POR TAMANHO DA EMPRESA

PRODUÇÃO	PERDAS NO PROCESSO (%)
Pequenas	15,13
Médias	14,55
Grandes	12,55
Média do segmento	14,07

FONTE: POLZL (2002)

Outros autores trabalharam no segmento de compensados, visando determinar e quantificar as perdas no processo. KOCH (1976), determinou que de uma tonelada de toras de coníferas já descascadas se obtêm 0,45 toneladas de compensado sem lixamento e com cola, 0,06 toneladas de lâminas aplainadas para uso em miolos de painéis, 0,08 toneladas de partículas para uso em chapas de partículas, 0,30 toneladas de partículas para uso em polpa e 0,12 toneladas de partículas para uso como combustível.

Trabalhando com painéis compensados sarrafeados, ECKER et al. (2003) encontraram um rendimento de 43,75% para todo o processo produtivo, desde o corte dos sarrafos verdes.

BRAND et al. (2004) estudaram as diversas operações de uma indústria de painéis de compensado sarrafeado, determinando os rendimentos médios de cada operação. Nesse segmento, por meio da metodologia do balanço de material, os autores demonstraram que a atividade de manufatura de painéis que mais contribui para a geração de resíduos é a preparação dos sarrafos de madeira sólida para a coladeira, que inclui a classificação de madeiras. Por outro lado, a etapa de usinagem com menor geração de resíduos foi a seccionadora, que segundo os autores se deve em grande parte ao pequeno volume de painéis que passa por essa etapa. Foi verificado também que apenas 18,66%, em média, dos resíduos gerados são vendidos, sendo o restante queimado na caldeira.

2.2.2 Resíduos de Madeira das Serrarias

Segundo o INSTITUTO PRÓ-NATURA (2002), existem por volta de 2.500 empresas na região Amazônica, que produzem aproximadamente 9,7 milhões de m³ de produtos madeireiros anualmente, dos quais, 63% destinados à construção civil. ARIMA et al. (1999) citaram que essas empresas geram um grande volume de resíduos de madeira, considerando desde a tora no pátio da empresa até as pranchas serradas, compensados ou laminados, estimado entre 60 e 68% do volume de madeira bruta processada. De acordo com os autores, a baixa produtividade deve-se ao equipamento obsoleto, formas inadequadas de armazenar

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

GERWING et al (2001) examinaram os fatores que influenciam o rendimento do processamento de toras em dez serrarias e duas laminadoras em Paragominas, na Amazônia Oriental. Os rendimentos médios totais foram mais altos para as laminadoras (39%), seguindo-se as serrarias que produzem para o mercado doméstico (36%) e as de exportação (32%). Os autores observaram que uma variedade de fatores influenciam o rendimento do processamento de toras, como a degradação durante o armazenamento, danos causados por insetos e a variação na espessura da madeira processada, resultante da utilização de equipamentos de processamento inadequados ou gastos. Por essa razão, encontraram grandes diferenças entre os rendimentos de cada serraria, sendo o valor mais alto igual a 55% e o mais baixo igual a 27%. O rendimento das empresas madeireiras foi maior (em até 10% do volume total da tora) para aquelas que usavam sobras de madeira ou de laminados para fabricar produtos secundários.

HILTON (2006), no trabalho de diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul, concluiu que o tratamento dos resíduos e sobras como um produto permitirá que as serrarias tenham melhor competitividade para a madeira serrada oferecida, tanto para a indústria da construção civil como para a indústria moveleira. A produção de produtos de maior valor agregado (PMVA), dentre os quais o autor incluiu os compósitos polímero-madeira, permitirá o aproveitamento das sobras, descartes e resíduos o que, diante de um quadro de escassez de matéria-prima, é uma das capacitações em que as empresas deverão concentrar algum investimento.

2.2.3 Resíduos de Madeira da Indústria Moveleira

Poucos são os trabalhos que analisaram a geração de resíduos nas indústrias moveleiras. HILLIG et al. (2004) realizaram o diagnóstico da geração de resíduos do pólo moveleiro da serra Gaúcha, que proporcionou estimar a quantidade de resíduo de madeira e derivados gerados e que serviu de base para a primeira fase deste trabalho. A Tabela 2 apresenta as quantidades de matérias-primas de madeiras

consumidas pelas empresas amostradas e as médias de aproveitamento para cada classe de matéria-prima, calculadas em médias proporcionais ao consumo de cada empresa. Os autores comentaram que, com relação às principais matérias-primas (madeira e derivados) utilizadas, verifica-se ainda uma predominância do uso de chapas aglomeradas seguidas, em ordem de consumo, pelo uso de MDF, madeira serrada e compensado. A utilização de determinada matéria-prima está relacionada às linhas de produtos fabricados, sendo que o aglomerado atende principalmente a produção de móveis retilíneos seriados.

TABELA 2 – MATÉRIAS-PRIMAS, MADEIRA E DERIVADOS, CONSUMIDAS PELAS EMPRESAS AMOSTRADAS E MÉDIAS PROPORCIONAIS DE APROVEITAMENTO

MUNICÍPIO	N ¹	MAD. (M ³)	APR. (%)	MDF (M ³)	APR. (%)	AGL. (M ³)	APR. (%)	COM. (M ³)	APR. (%)	TOT. ² (M ³)
Bento Gonçalves	27	2057	68,18	5029	94,99	19504	93,59	319	94,98	26910
Caxias do Sul	35	2144	63,89	217	91,49	236	94,69	2497	93,82	5025
Flores da Cunha	14	2766	63,05	2110	92,55	1621	91,36	46	89,55	6542
Lagoa Vermelha	18	538	88,38	4541	94,51	4276	94,90	30	92,38	9386
TOTAIS	94	7505	66,51	11899	94,31	25638	93,68	2894	93,86	47865

FONTE: HILLIG et al. (2004)

¹ Número de empresas visitadas

² Total de matéria-prima consumida

MAD= madeira; AGL= aglomerado; COM= compensado; APR= aproveitamento

Na Tabela 3, segundo HILLIG et al. (2004), são apresentados as quantidades de resíduos gerados de serragem, maravalhas e retalhos, onde se verifica que Flores da Cunha apresenta uma elevada geração de resíduos de serragem em comparação com a proporção de matéria-prima consumida. Os autores comentam que este fato decorre de que duas empresas amostradas neste município trabalham com madeira serrada de pinus para produção de móveis seriados. Assim, além da maior perda que ocorre no beneficiamento da madeira serrada, o volume a granel de serragem produzida é aumentada pela baixa massa específica da madeira.

TABELA 3 - QUANTIDADES DE RESÍDUOS DE MADEIRA E DERIVADOS GERADOS NAS EMPRESAS VISITADAS

MUNICÍPIO	N ¹	SERRAGEM ² (m ³)	MARAVALHAS ² (m ³)	RETALHOS ² (m ³)
Bento Gonçalves	27	2558	131	2445
Caxias do Sul	35	486	159	191
Flores da Cunha	14	2619	3935	599
Lagoa Vermelha	18	495	851	213
TOTAIS	94	6159	5077	3449

FONTE: HILLIG et al. (2004)

¹ Número de empresas visitadas² Quantidades de resíduos gerados, dados em volume a granel

A Tabela 4 apresenta os valores estimados da geração de resíduos por classe de matéria-prima e por município para as empresas amostradas. Os dados estimados podem ser facilmente estendidos para a produção total do município ou mesmo do Estado, se for considerada a proporção da amostra em relação à produção do município e a participação de cada município na produção estadual (HILLIG et al, 2004).

TABELA 4 - ESTIMATIVA DOS VOLUMES MENSAIS DOS RESÍDUOS GERADOS POR CLASSE DE MATÉRIA-PRIMA E POR MUNICÍPIO NAS EMPRESAS VISITADAS

MUNICÍPIO	MADEIRA			MDF			AGLOMERADO		COMPENSADO	
	Serrag (m ³)	Marav (m ³)	Retal (m ³)	Serrag (m ³)	Marav (m ³)	Retal (m ³)	Serrag (m ³)	Retal (m ³)	Serrag (m ³)	Retal (m ³)
Bento Gonçalves	771	93	736	297	38	283	1472	1407	19	18
Caxias do Sul	392	156	154	9	3	4	6	2	78	31
Flores da Cunha	2022	3385	463	311	551	71	277	63	10	2
Lagoa Vermelha	58	170	25	232	681	100	203	87	2	1
Totais	3243	3804	1378	849	1273	458	1958	1559	109	52

Serrag = Volume a granel de serragem gerada

Marav = Volume a granel de maravalhas gerada

Retal = Volume a granel de retalhos gerados

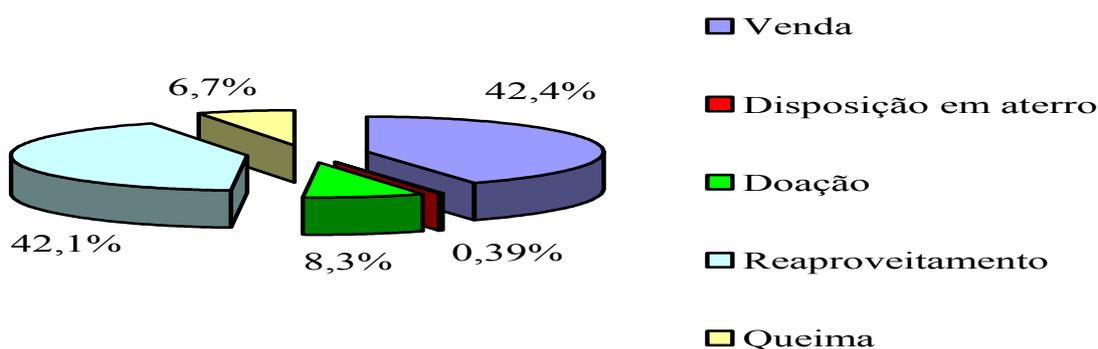
FONTE: HILLIG et al. (2004)

Além das estimativas da geração de resíduos, o trabalho de HILLIG et al. (2004) identificou as principais espécies de madeiras utilizadas como madeira serrada e apresenta também um valor médio da densidade a granel das diferentes classes de resíduos. Como madeira serrada, são usadas madeiras de *Pinus taeda*, *Eucalyptus* sp., *Apuleia leiocarpa* (garapeira) e *Tabebuia cassinoides* (caixeta). Os valores médios de densidade a granel citados para as diferentes classes de resíduos são:

- Serragem (em geral) = 223 kg/m³
- Serragem de MDF = 190 kg/m³
- Serragem de aglomerado = 265 kg/m³
- Serragem de madeira serrada = 216 kg/m³

Com relação ao destino ou aproveitamento, SCHNEIDER et al. (2004) verificaram que uma parcela expressiva dos resíduos, igual a 6,7%, ainda é descartada para queima, sem aproveitamento. Outra parcela que corresponde a 8,3% dos resíduos gerados é doada, não agregando valor nenhum nesta operação. A Figura 3 apresenta o destino do resíduo de madeira e derivados das indústrias do pólo moveleiro da serra Gaúcha.

FIGURA 3 - DESTINO DO RESÍDUO DE MADEIRA E DERIVADO DAS INDÚSTRIAS DO PÓLO MOVELEIRO DA SERRA GAÚCHA



FONTE: SCHNEIDER et al. (2004)

LIMA (2005) num trabalho com objetivo de verificar o desempenho ambiental da indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Arapongas, verificou que de todos os resíduos gerados, os resíduos em maior quantidade são os

resíduos de madeira, respondendo por 85% dos resíduos totais gerados. Desses resíduos, como pedaços, pó e cepilho, boa parte são destinados para confecção de briquetes. O autor comentou que, no geral, 82% das empresas pesquisadas aproveitam algum tipo de resíduo no próprio processo, 53% vendem parte dos resíduos e apenas 6% queimam.

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo a ASTM (2001), compósito é uma mistura física, de dois ou mais materiais combinados para formar um novo material útil de engenharia com propriedades diferentes aos componentes puros, podendo ser obtidos por combinação de metais, cerâmicas ou polímeros. TITA (1999) fez uma extensa descrição dos materiais compósitos, observando que são constituídos de um ou mais materiais dispersos numa matriz, chamados de reforço ou carga. Os materiais de reforço podem ser fibras curtas, longas, contínuas, descontínuas, e outras com objetivo de fornecer resistência. A matriz envolve o reforço, dando forma ao compósito. Abaixo de um comprimento mínimo, as fibras deixam de atuar como reforço e fazem o papel de enchimento ou carga.

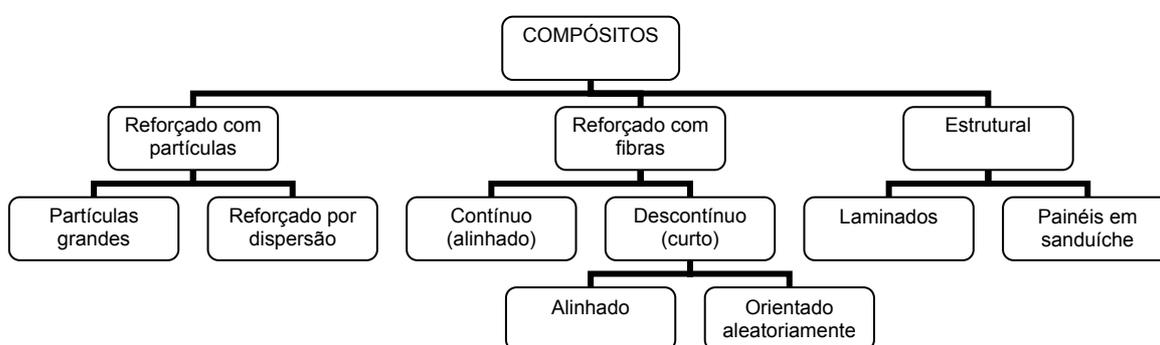
O importante num compósito é o efeito sinérgico que se observa no sistema, onde as suas propriedades finais são uma mistura melhorada das propriedades de seus componentes individualmente (CALLISTER, 2002). PANSIN & ZEEUW (1970) descrevem a madeira como um exemplo natural de compósito, altamente complexo, composto por fibras, principalmente celulose, dispersa numa matriz de lignina e hemicelulose.

O conceito de compósito é amplo e constitui uma denominação empregada para os mais diversos materiais desenvolvidos pelo homem. Historicamente, pode-se dizer que o termo compósito é usado para descrever desde as primeiras misturas de argila reforçada com palha, usadas para tijolos no antigo Egito, até o desenvolvimento de novos compósitos metal/matriz e cerâmica/matriz, bem como o compósito carbono/carbono, para aplicações a altas temperaturas, que estão sendo desenvolvidos na atualidade (GORNI, 2001).

CALLISTER (2002) considera que um compósito deve ser um material multifase, com propriedades superiores a cada fase de sua composição. Uma

dessas fases deve ser aglomerante e outra reforçante, caracterizando as fases de matriz e fibra, respectivamente. Em razão da variedade de materiais que podem constituir as diferentes fases dos compósitos, o autor classificou-os em três grupos de acordo com o material reforçante: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais (FIGURA 4).

FIGURA 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS SEGUNDO O MATERIAL DE REFORÇO USADO



FONTE: CALLISTER (2002)

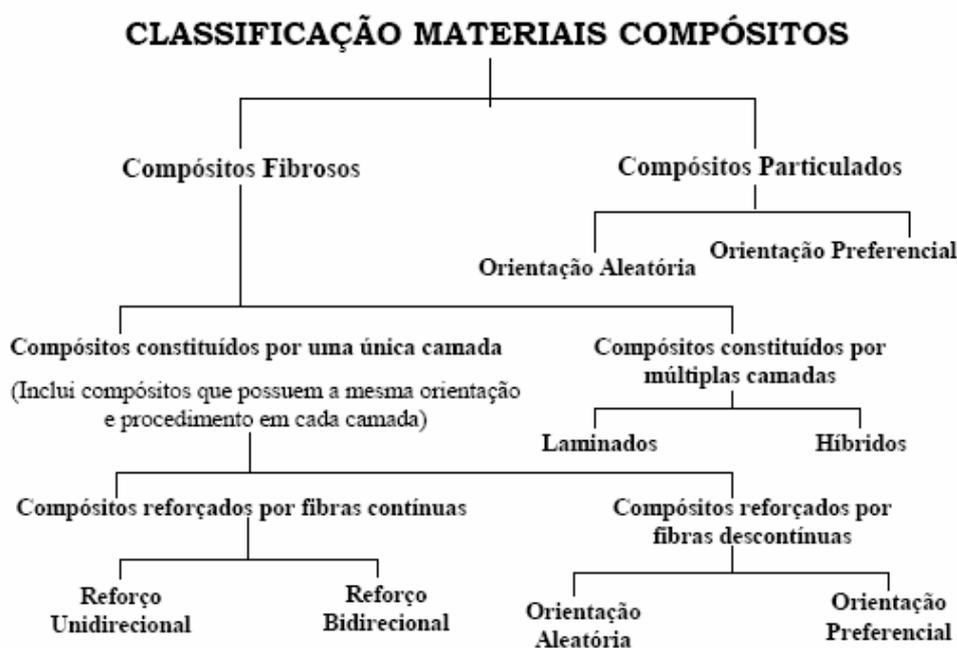
BITTENCOURT (2001) classifica compósitos bifásicos em três grandes categorias dependendo do tipo, geometria e orientação da fase reforçadora (fibra), como:

- compósitos granulares: aqueles formados por partículas de vários tamanhos e formas, dispersos aleatoriamente na matriz. Devido a essa aleatoriedade, tais compósitos podem ser considerados quase-homogêneos e quase-isotrópicos, se examinados numa escala maior que o tamanho das partículas;
- compósitos de fibras descontínuas: que apresentam como reforço pequenas fibras, pois são consideradas largas quando o comprimento é comparado com seu diâmetro e podem ser dispostas aleatoriamente ou ao longo de uma direção. No primeiro caso, o compósito pode ser considerado quase-isotrópico, e no segundo, tende a ser anisotrópico ou, mais especificamente ortotrópico;

- compósitos de fibras contínuas: são reforçados por longas fibras contínuas e mais eficientes do ponto de vista de rigidez e resistência mecânica. As fibras podem ser todas paralelas (unidirecional), dispostas perpendicularmente (bidirecional) ou orientadas em vários ângulos (multidirecional).

RATNER et al. (1996) classificam os compósitos de acordo com a morfologia da fase dispersa usada, em compósitos fibrosos e particulados. Para diferenciar fibras de partículas, os autores conceituam partículas como componentes que apresentam uma razão de aspecto, que é a relação entre a maior e menor dimensão do corpo (L/D), menor que três (Figura 5).

FIGURA 5 - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS SEGUNDO A MORFOLOGIA DA FASE DISPERSA



FONTE: RATNER ET AL (1996)

Com base na fase de matriz (TITA, 1999; CALLISTER, 2002; BITTENCOURT, 2001), pode-se classificar os compósitos em quatro principais grupos, divididos em:

- compósitos de matriz polimérica dividem-se em termorrígidos (epóxi, poliamida, poliéster) e termoplásticos (poli-éter-cetona, poli-sulfona, poli-

éterimida) reforçados com fibras de vidro, carbono, aramida (Kevlar) ou boro. São usados, fundamentalmente, em aplicações a baixa temperatura;

- compósitos de matriz metálica consistem em ligas metálicas (alumínio, magnésio, titânio, cobre) reforçados com fibras de boro, carbono ou cerâmicas. Sua temperatura de serviço máxima é definida pela temperatura de fusão da matriz;
- compósitos de matriz cerâmica consistem de cerâmica (carbeto de silício, óxido de alumínio, vidro, nitreto de silício) reforçada com fibras cerâmicas. São indicados para aplicações a altas temperaturas;
- compósitos carbono / carbono consistem de matriz e reforço de carbono ou grafite. Apesar da mesma composição, fibra e matriz apresentam diferentes propriedades físicas e mecânicas. Apresentam a propriedade única de resistência relativamente alta a altas temperaturas associada à baixa massa específica e expansão térmica.

Ainda, existem os Compósitos laminados, constituídos de finas camadas de diferentes materiais colados juntos, como os bi-metais, compensados e fórmica (BITTENCOURT, 2001).

2.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CELULÓSICAS

Segundo RAJ et al. (1989), os polímeros mais utilizados nestas misturas são as poliolefinas polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno de baixa densidade (LDPE), de característica apolar. Como os materiais lignocelulósicos apresentam característica polar, o que diminui sua interação com o polímero, se faz necessária a presença de um agente de acoplamento, para melhorar a interação entre a matriz polimérica e o agregado.

ROWEL et al. (1997) destacam as principais vantagens do uso de fibras lignocelulósicas de culturas anuais em compósitos poliméricos, como sua baixa densidade, não abrasivas, biodegradáveis, facilmente recicláveis, de baixo custo e possibilitarem o uso de altos teores, o que resulta em altas propriedades de rigidez e altas propriedades específicas dos compósitos. Além disso, possuem um largo

espectro como componentes estruturais e não estruturais, devido a grande variedade de fibras disponíveis no mundo.

Os compósitos reforçados com fibras longas são geralmente destinados a aplicações estruturais, sendo que suas propriedades finais dependem principalmente da orientação e configuração das fibras. Já as propriedades finais dos compósitos de fibras curtas são mais difíceis de prever, pois surgem problemas na distribuição e orientação desigual das fibras dentro da matriz. A orientação das fibras é de difícil controle pelos métodos de processamento comumente usados pela indústria de extrusão, compressão e moldagem por injeção com materiais termoplásticos (ROWEL et al., 1997).

LEÃO et al. (1998) citam que os compósitos poliméricos reforçados com fibras celulósicas, têm larga aplicação em diversos setores industriais como embalagens, construção civil, automotiva, etc. Muitos dos resíduos usados nesses materiais, no final de sua vida útil são dispostos em aterros ou incinerados, representando uma forma de poluição por sua combustão incompleta e armazenamento inadequado, causando grave problema ambiental. Além disso, os autores comentam que uma causa de atração por esses novos materiais deve-se a recursos renováveis e que podem evitar pressões sobre os recursos florestais.

A redução de custo dos compósitos é grande com a adição de fibras naturais. Também outro aspecto positivo descrito por GURRAM et al. (2002) é a redução na utilização de componentes baseados em petróleo e a abertura de novos mercados para produtos agro-florestais, inclusive com a utilização de seus resíduos.

De acordo com GORNI (2001), na história de desenvolvimento dos materiais poliméricos, alguns fatos foram marcantes para o caso específico dos compósitos poliméricos reforçados com fibras celulósicas. Em 1854, uma mistura de goma-laca com serragem foi patenteada como material para moldagem por Samuel Peck (E.U.A.), para uso em estruturas e maletas. Em 1907, surgiram as primeiras resinas fenólicas feitas por Baekeland combinadas com serragem de madeira e posteriormente com papel, adicionados antes da moldagem. Desde meados de 1960, tecidos sintéticos, como por exemplo poliéster, acrílico e nylon, foram misturados com algodão. Em 1980 com o custo crescente do petróleo aumentou o

interesse no uso de celulose com polímeros, chegando-se a usar 60% de celulose em polipropileno, no processo de extrusão em filmes e moldes por pressão.

Atualmente os problemas são de outra ordem e impõem novas tendências no desenvolvimento de polímeros. O desenvolvimento de resinas a partir do zero se torna bem mais raro. A ênfase atual está na formulação de polímeros já existentes de forma a se obter materiais com propriedades otimizadas. A poluição ambiental e a futura escassez do petróleo estabelecem uma necessidade urgente na propagação da utilização de compósitos com celulose. Materiais de celulose como madeira em suas diferentes formas (serragem e polpa de madeira), algodão, sabugo de milho e outros subprodutos vegetais são usados como fonte de fibras de celulose. Em geral são utilizadas como cargas, mas diversos estudos têm demonstrado que podem inclusive melhorar as propriedades dos compósitos (GORNI, 2001).

MARTINS et al. (2004) realizaram a caracterização mecânica e térmica de compósitos de Poli (Cloro de Vinila) reforçados com fibras de sisal. A mistura das fibras à matriz foi realizada em misturador de rolos aberto e foram estudadas as variáveis: comprimento da fibra, tipo de plastificante e teor de fibras. Os autores consideraram o comprimento de 6 mm, como comprimento ótimo de fibra nas condições estudadas. Para esse comprimento de fibras, o aumento da sua proporção no compósito provocou diminuição da resistência à tração e do alongamento, e aumento do módulo de elasticidade.

Numa extensa revisão de literatura sobre o uso da fibra de juta em compósitos poliméricos, MOHANTY & MISRA (1995) comentaram que uma das principais vantagens do uso de fibras naturais em plásticos reforçados é seu baixo custo em comparação com sua resistência mecânica. Essa vantagem torna as fibras naturais uma alternativa em relação às fibras de vidro e às fibras de carbono, principalmente para os países em desenvolvimento. Os autores comentam que as fibras de Juta podem ser usadas em compósitos com polímeros termorrígidos e com polímeros termoplásticos. Conforme os autores, o principal polímero termorrígido utilizado nesses compósitos é o poliéster insaturado, no entanto, são também usadas resinas fenólicas, resinas aminadas e resinas epoxídicas. Para confecção de

compósitos com matriz termoplásticas os principais polímeros usados são o HDPE, LDPE, PP, poliestireno (PS) e seus copolímeros.

SANADI et al (2001) num trabalho com compósitos de polipropileno e fibras de *Kenaf*, com alta carga de fibras, incorporaram cerca de 85% em peso de fibras sobre o PP. As propriedades dos compósitos, como módulo de elasticidade e resistência à flexão, foram superiores a maioria dos tipos existentes de chapas aglomeradas e de chapas duras de fibras de baixa e média densidade. Os compósitos Knaf/PP de alta densidade apresentaram médias de módulo de ruptura (MOR) de 75 Mpa e médias de módulo de elasticidade (MOE) de 6,4 Gpa. Análises térmicas adicionais dos compósitos indicaram que a cristalinidade do PP nos compósitos não foi afetada pelo processo utilizado.

Num estudo para uso de diferentes fibras celulósicas em compósitos, visando seu uso na indústria automobilística, LEÃO et al. (1998) utilizaram fibras de curaua, juta, rami e sisal em diversas formulações com polipropileno, por processo de termoformagem. Os autores concluíram que a fibra de curaua obteve os melhores resultados nos compósitos, nas condições testadas. Todas as fibras utilizadas se mostraram competitivas com outros materiais tradicionais como os compósitos à base de madeira e de fibra de vidro, ressaltando que a densidade dos compósitos foi uma variável importante, pois os compósitos mais densos apresentaram melhores resultados.

CAULFIELD et. al. (2001) utilizaram fibras purificadas de coníferas e de folhosas para confecção de compósitos com nylon 6 e nylon 66, em função da temperatura de degradação da celulose purificada, com teores de alfa celulose acima de 95%, estarem acima da temperatura de fusão desses nylons. Por outro lado, os autores utilizaram um processo de “baixa temperatura” (ou “*chill method*”) para minimizar os efeitos do super aquecimento na degradação do material, que permitiu a obtenção de compósitos uniformes com pequena descoloração e não carbonizados. Os compósitos apresentaram valores de propriedades mecânicas intermediárias entre os valores encontrados para compósitos nylon/wollastonite e compósitos nylon/fibra de vidro. Assim, foram considerados com bom potencial para uso na indústria automobilística como elementos estruturais ou plásticos de engenharia, bem como para outras aplicações estruturais.

No estudo de materiais de engenharia confeccionados com nylon 6 e reforçados com fibras celulósicas de alta pureza, SEARS et al. (2001) concluíram que fibras com teor de α celulose maior ou igual a 95% podem prover boas propriedades de reforço nestes materiais. Os autores comentaram que das seis polpas de madeira estudadas, duas com teor de α celulose maior que 97% tiveram resultados totais melhores que outra polpa aparentemente superior (celulose kraft de folhosas).

Uma área de estudo que tem recebido pouca atenção é a incorporação de fibras celulósicas como agentes de reforço em matrizes de polímeros naturais. Uma vez que fibras celulósicas misturadas com termoplásticos sintéticos não criam um material completamente biodegradável, sistemas com matrizes naturais, tal como borracha natural e poly(hydroxybutyrate), podem ser usados em compósitos com benefícios na biodegradabilidade do compósito resultante (GEETHAMMA ET AL., 1997; AVELLA ET AL., 1993).

BOURBAN ET AL., 1997 utilizaram fibras celulósicas regeneradas, contínuas, como reforço em poly(3-hydroxybutyrate)-co-poly(3-hydroxyvalerate) (PHB/V). O polímero matriz foi aplicado em forma de pó. Compósitos com teores de 30% em volume de fibra foram produzidos e caracterizados. A resistência à tração dos compósitos variou de 128 a 278 MPa, com um módulo de elasticidade de 6 a 11 GPa. Entretanto, os autores consideraram a fraca adesão interfacial como um obstáculo para o uso desse compósito baseado num polímero natural.

2.5 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM MADEIRA

YOUNGQUIST (1995) e HEDENBERG & GATENHOLM (1995) destacam a necessidade de se utilizar “fibras” de madeira, oriundas de florestas de baixa qualidade e de reciclagem dos resíduos, em novos produtos baseados em matrizes de polímeros termoplásticos. A madeira oferece inúmeras vantagens, tais como baixo custo e baixa densidade, porém, seu principal problema é a agregação. Contudo alguns estudos demonstraram que o emprego deste material na matriz polimérica pode promover melhorias na performance do produto acabado.

BESHAY et al (1984) e CZARNCKI & WHITE (1989) destacam que, a cada dia aumenta o uso de compósitos poliméricos reforçados com fibra de madeira devido às vantagens que este produto apresenta quando comparado às fibras minerais: baixa densidade, baixo custo, alta disponibilidade das fibras de madeira, uma vez que são provenientes de fontes renováveis e sofrerem poucos danos durante o processamento.

SIMONSEN (1997), utilizou a regra das misturas para desenvolver modelos matemáticos que permitiram a comparação da eficiência do reforço da dureza de compósitos reforçados com madeira pelo uso de diferentes fibras como enchimento. Baseado na estimativa da dureza de fibras de madeira, um fator de eficiência de reforço é deduzido de dados experimentais de compósitos através do uso de curvas de estimativas. Polietileno, polipropileno, poliestireno e estireno-anidrido maleico, foram usados como fase matriz e fibra de vidro, polpa termomecânica de madeira, serragem de palha e serragem de madeira, foram usados como reforço. O autor encontrou, teoricamente, um aumento de dois para quatro vezes na dureza dos compósitos, dependendo das misturas utilizadas.

STARK (1999), num estudo com compósitos de polipropileno e madeira em proporções de 20% e 40%, verificou que o uso de fibras obtidas de cavacos de madeiras de folhosas e de coníferas proporcionou maiores valores médios das propriedades de resistência à tração e de resistência à flexão nos compósitos, do que o uso de serragem de madeira, principalmente quando se usou maior proporção de madeira. Também, que o uso das fibras ao invés da serragem causou menor percentual de contração do compósito no molde (*mold shrinkage*).

Em outro trabalho semelhante, STARK & ROWLANDS (2003) estudaram os efeitos de diferentes tamanhos de partículas de serragem de madeira nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno e madeira. As propriedades desses compósitos foram também comparadas às propriedades de compósitos reforçados com fibras de madeira obtidas por desfibramento termomecânico. Os autores verificaram que a razão de aspecto, e não o tamanho da partícula, tiveram um grande efeito nas propriedades de resistência e na dureza dos compósitos.

Trabalhando com a liquefação da madeira para aplicação em espumas de poliuretano, MALDAS & SHIRAISHI (1995) estudaram os efeitos de vários

parâmetros da reação como temperatura, tempo, tipo e concentração do polioliol e agente de expansão. Concluíram que espumas rígidas de poliuretano podem ser preparadas a partir de misturas concentradas de madeira liquefeita/polioliol e isocianato. As espumas de poliuretanos preparadas pelos autores apresentaram excelente densidade e propriedades mecânicas permitindo aos mesmos dizer que, desde que o custo do resíduo de madeira é inexpressivo, a madeira liquefeita em polioliol pode se constituir num promissor recurso para um ingrediente primário de espumas rígidas de poliuretano.

2.5.1 Resíduos de Madeira como Matéria-Prima para Compósitos

Os resíduos sólidos oriundos da indústria madeireira, formados basicamente por serragem, tem sido aproveitados na mistura com diferentes polímeros com o objetivo de se fabricar um novo material com aplicações no setor de móveis, na indústria de construção civil e outros setores (ROWEL et al., 1997).

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

FALK et al. (1999), em trabalho sobre a aplicação de compósitos poliméricos, compararam as propriedades mecânicas de compósitos de termoplásticos com madeira, com as propriedades mecânicas dos painéis de madeira com polímeros termorrígidos. Para tal, prepararam mais de 2000 corpos-de-prova obtidos de chapas confeccionadas com serragem de pinus que variou em proporções de 20% a 60% em massa, misturados em proporções iguais de LDPE e PP. Os corpos-de-

prova foram submetidos a ensaios físico-mecânicos, segundo a norma ASTM D 1037 específica para os painéis de madeira aglomerada. Os valores médios obtidos foram comparados aos valores encontrados na literatura para cinco tipos de painéis convencionais de madeira: compensados (*plywood*), aglomerados estruturais (*oriented strand board - OSB, waferboard*), aglomerados convencionais (*particleboard*), chapas duras de fibras (*hardboard*) e chapas de fibras de média densidade (*MDF*). Os autores concluíram que, em média, os compósitos fabricados foram inferiores aos painéis de madeira em MOR e MOE (flexão estática) e coeficiente de expansão térmica, similares em resistência à tração, dureza e cisalhamento e superiores em absorção d'água em peso e inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água.

TEIXEIRA et al. (2002) confeccionaram chapas com resíduos de *Eucalyptus grandis* e LDPE utilizando o processo convencional para chapas de madeira aglomerada. Nesse caso, foi formado um colchão manualmente com diferentes misturas de cavacos de madeira e LDPE e prensado numa prensa de pratos planos por 15 minutos. Com base em ensaios específicos para chapas de madeira aglomerada, os resultados mostraram propriedades físico-mecânicas satisfatórias, principalmente naquelas chapas com maiores proporções de LDPE. Os autores recomendaram o uso das chapas para aplicações em pisos, em função dos requisitos de baixo inchamento em espessura e dureza.

Estudos realizados por WOODHAMS et al. (1984) verificaram que a distribuição das fibras curtas de serragem na matriz polimérica aumentam, em geral, a dureza e as resistências mecânica e química do produto.

2.5.2 Compósitos de HDPE Reforçados com Resíduos de Madeira

O HDPE é um material polimérico obtido a partir de hidrocarbonetos não saturados ditos olefinas e, assim como o LDPE e o PP, é chamado de poliolefina (MILES & BRISTON, 1975). Com relação à estrutura do polímero, os termos polietileno “linear” e polietileno “ramificado” são também usados. O HDPE linear é produzido por um processo de baixa pressão, que é o mesmo processo usado para

produzir o LDPE ramificado. A estrutura mais simples que o HDPE pode apresentar é uma cadeia completamente linear de unidades $-CH_2$.

As propriedades do HDPE dependem da sua estrutura química, do peso molecular e do grau de cristalinidade e, por isso, estão relacionadas também com a densidade do polímero. Um aumento da densidade ocasiona um aumento do ponto de amolecimento, da rigidez e da dureza superficial e uma diminuição da resistência ao impacto. Em geral, o HDPE possui ponto de fusão em cerca de $127^{\circ}C$ e densidade variando de $0,95$ a $0,97 \text{ g/cm}^3$ (BILLMEYER, JR., 1971).

A utilização das poliolefinas em compósitos reforçados com madeira tem sido amplamente estudada em todo o mundo. Embora esses polímeros sejam apolares, o que torna difícil sua interação com a madeira que é polar, suas características de terem um baixo ponto de fusão e de serem facilmente recicláveis, os tornam apropriados para uso nesses compósitos (ENGLISH et al, 1994). Das poliolefinas, os polietilenos são os polímeros que apresentam maior disponibilidade e que se apresentam em maior proporção nos resíduos sólidos domésticos recicláveis (KILLOUGH, 1996).

KAMDEM et al. (2003) estudaram as possibilidades de uso do HDPE virgem e reciclado em compósitos reforçados com serragem de madeira de *Pinus resinosa* Ait. tratados com cromo-cobre-arsênico (CCA). As misturas foram realizadas num misturador de laboratório de alta intensidade de 10 litros e placas de $0,80 \text{ cm} \times 24,1 \text{ cm} \times 40,6 \text{ cm}$ foram moldadas numa prensa de pratos planos. Os resultados mostraram que os compósitos com madeira tratada com CCA apresentaram melhores propriedades de resistência mecânica e de anti-foto-degradação, e melhor resistência à biodegradação, do que os compósitos com madeira virgem ou com madeira reciclada de chapas coladas com uréia-formaldeído. Os autores atribuíram a melhor resistência mecânica à melhor difusão de calor obtida em função da presença dos complexos de cromo, de cobre e de arsênico na madeira tratada com CCA. Também a baixa foto-degradação e a baixa biodegradação foram atribuídas a presença de cobre e cromo e de cobre e arsênico, respectivamente.

MAITI E SINGH (1986), examinaram diferentes tamanhos de partículas de serragem de madeira e sua influência em compósitos com HDPE, sem o uso de agentes de acoplamento. Amostras foram extrusadas e submetidas a ensaios de

tração. Os resultados mostraram um aumento do MOE com o decréscimo do tamanho da partícula, de 425 para 180 μm . Por outro lado, todos os compósitos apresentaram menor resistência à tração que o uso do polímero puro. Os autores consideraram que a diminuição da resistência, com o aumento do tamanho da partícula, foi devida a uma adesão fraca entre os componentes, desde que nenhum agente de acoplamento foi usado.

Num estudo da influência da espécie de madeira nas propriedades de compósitos madeira-plástico, WOLCOTT (2003) usaram duas formulações de serragem, HDPE, aditivos e lubrificantes, variando entre uma formulação e outra apenas a espécie de serragem de madeira. *Pinus sp.* e *Pseudotsuga menziesii* foram processados em serragem de madeira seca e extrusados com HDPE em idênticas formulações e técnicas de processamento. Embora essas espécies apresentem MOE e MOR, à flexão, similares e os compósitos produzidos tenham apresentado mesma densidade, os compósitos produzidos com *Pseudotsuga menziesii* apresentaram valores de MOE e MOR 78% e 76%, respectivamente, dos valores de MOE e MOR apresentados pelos compósitos com *Pinus sp.* Os autores consideraram essa diferença em resistência à flexão, devida à diferença na interação entre madeira e plástico para as duas espécies, sugerindo que a espécie de madeira deve ter uma significativa influência na estrutura do material e, em consequência, nas suas propriedades.

LI & WOLCOTT (2004) estudaram as propriedades reológicas de compósitos de HDPE e madeiras de *Pinus sp.* e *Acer sp.*, usando um reômetro capilar. Concluíram que a viscosidade do material depende de ambos, teor de madeira e espécie. O fluxo extensional, por outro lado, depende fortemente do teor de madeira e menos da espécie.

2.6 TRATAMENTOS QUÍMICOS E AGENTES COMPATIBILIZANTES

Devido à diferente polaridade das poliolefinas e da celulose, a sua interação com fibras de madeira é fraca, resultando em fracas propriedades físicas e mecânicas do produto final. É possível que materiais compósitos sejam preparados a partir de PP, PE, reciclados e mistura desses polímeros e resíduo de celulose.

Com o intuito de estabelecer compatibilidade, a superfície da celulose pode ser modificada por recobrimento com termoplásticos maleatados. Além disso para melhorar o retardamento de chama e minimizar a degradação dos plásticos, vários materiais retardante de chama, resistentes ao calor e antioxidantes, tais como ácido bórico, borato de sódio e hidróxido de magnésio podem ser incorporados aos compósitos durante o processamento. Diversas pesquisas citadas por SEAVEY (1999) revelaram que a adesão e afinidade de substância química entre celulose e uma matriz polimérica podem ser melhoradas modificando a superfície da fibra de celulose ou o polímero pelo uso de vários elementos aditivados.

MALDAS et al. (1990), estudaram o aumento da polaridade de poliestireno, quando modificado com a introdução de grupos carboxila na cadeia polimérica. As propriedades mecânicas dos compósitos são melhoradas, quando a matriz polimérica sofre graftização com grupos de maior polaridade.

ALMA et al. (1995) constataram que a capilaridade da madeira facilita a introdução de monômeros de estireno com metacrilato de metila, seguido da polimerização dos mesmos. A interação polímero-madeira é fornecida pelo grupo metacrilato de metila que forma pontes de hidrogênio com as hidroxilas da madeira. O compósito formado é hidrofóbico, o que aumenta o tempo de vida útil do produto final.

Também, foi estudado os efeitos da adição de modificadores de interface na estrutura e propriedades de compósitos de poliolefinas e fibras de madeira. Embora o uso destas fibras reduza o custo total dos compósitos, estes apresentam baixas propriedades mecânicas quando em ausência de um modificador de interface adequado, como anidrido maleico, peróxido de benzoíla e peróxido de dicumila. Isto é devido ao aumento da heterogeneidade no sistema. Estes processos passam, na maioria das vezes, por pré-tratamento das fibras com silanos e peróxido de benzoíla (ALMA et al., 1995).

De acordo com ENGLISH et al. (1994), os polímeros que formam a parede celular de lignocelulósicos podem ser permanentemente colados pela reação de agente químico orgânico com os grupos hidroxilas ou pelo uso de um catalizador que cause ligações cruzadas. Estes tratamentos aumentam a estabilidade dimensional de compósitos, mas podem causar diminuição da resistência. Um dos

tratamentos mais utilizados foi a acetilação da madeira com anidrido acético. Os autores comentam que um dos sistemas químicos de ligações cruzadas entre fibra e polímero mais estudado é a reação entre os grupos hidroxilas da parede celular e o formaldeído. Ligações cruzadas podem tomar lugar entre os grupos hidroxilas de mesmas cadeias ou entre diferentes cadeias de celulose, hemicelulose e lignina. Ligações cruzadas, entre formaldeído e fibras de madeira, têm sido testadas experimentalmente para aumentar a resistência à umidade do papel.

RIALS et al. (2000), ressaltam a necessidade de melhorar os fatores que influenciam a adesão, de forma a melhorar a interação entre as diferentes fases que são estabelecidas na formação de compósitos polímero-madeira. Os autores trabalharam com polpa de madeira de carvalho vermelho para descrever os efeitos da estrutura das camadas externas das fibras da madeira na interação com polipropileno e sua influência na morfologia e propriedades dos compósitos. As conclusões foram de que as características hidrofóbicas das fibras diminuíram e de que houve maior interação dessas com o polipropileno, pelo tratamento com silanos e produtos de titânio. Também, a interação polímero-fibra foi aumentada pelo uso de uma amina graxa, por meio da diminuição das características hidrofóbicas das faces da fibra. Porém, estes tratamentos provocaram perdas nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Isocianatos, silanos e peróxido de benzoíla são os principais agentes que tiveram sua influência comprovada na melhoria dos compósitos. Esse último apresentou melhores resultados quando usado com LDPE do que com HDPE. Por outro lado, o pré-tratamento com silano mostrou pequeno aumento da resistência mecânica, quando comparado com o aumento obtido com peróxido de benzoíla (BATAILLE et al., 1990).

BENGTSSON et al. (2005) estudaram a possibilidade do uso da tecnologia dos silanos para obter compósitos de polietileno com serragem de madeira com ligações cruzadas. HDPE graftizado com *viniltrimethoxy silane* (XLPE) foi usado para confecção de compósitos com serragem de madeiras de *Pinus* sp. e *Picea* sp. e comparado com compósitos confeccionados com HDPE não graftizado. Foi verificado um aumento da resistência à tração com o aumento da proporção de serragem usada, nos compósitos com HDPE graftizado. Desde que nos compósitos

de HDPE não graftizado isso não foi verificado, os autores consideraram como uma indicação de que houve melhor interação entre a madeira e o polímero nos compósitos onde a matriz foi graftizada com silano.

Outra opção muito utilizada é o uso de poliolefinas modificadas com anidrido maleico. RAJ et al (1989) usando fibras tratadas com HDPE e LDPE, modificados com anidrido maleico, confeccionaram compósitos com melhor resistência à tração que com o uso de fibras não tratadas. SELKE & CHILDRESS (1993) obtiveram melhores propriedades mecânicas em compósitos confeccionados com fibras de madeira de *Populus* sp. e HDPE, quando foi adicionado aos compósitos polipropileno modificado com MAPP, nas proporções de 1%, 3% e 5% em peso.

Atualmente, outros tratamentos também têm sido estudados, com finalidade de melhorar a adesão entre polímero e fibras de madeira e conseqüente melhora das propriedades mecânicas dos compósitos. Pré-tratamento das fibras com calor, em atmosfera controlada, foi testado em compósitos de HDPE e serragem de *Picea* sp. por ROBIN & BRETON (2001), enquanto *ethylene vinyl alcohol copolymer* (EVOH) foi usado em compósitos de polietileno de baixa densidade linear (LLDPE) e serragem de *Pinus radiata* por KIM et al. (2005). Em ambos os casos, foi constatado melhora nas propriedades dos compósitos de fibras tratadas.

De acordo com diversos autores, os agentes de acoplamento mais utilizados são à base de anidrido maleico e ácido acrílico (CORREA et al., 2003; GATENHOLM et al., 1993). LAI et al. (2003) estudaram o uso de anidrido maleico em diferentes poliolefinas, mostrando os melhores resultados quando usado para funcionalizar HDPE e LLDPE.

COLOM et al (2002) analisaram a influência de pré-tratamento das fibras de madeira de *Populus* sp. em compósitos confeccionados com diferentes proporções de HDPE e fibras. Os autores utilizaram silano e epolene, concluindo que a adição desses dois agentes de acoplamento melhoraram a dispersão da fase contínua de HDPE.

Mais ainda, foi verificado que o tratamento com silano facilitou o contato direto entre fibras lignocelulósicas e matriz HDPE, de forma mais intensa que para os compósitos onde a fibra não foi tratada ou onde foi usado epolene. As diferenças observadas entre os compósitos foram explicadas por meio dos mecanismos de

adesão. Segundo esse estudo, o mecanismo de adesão principal para os compósitos não tratados foi a interdifusão, para os compósitos tratados com epolene um mecanismo múltiplo de adsorção-molhabilidade e para os compósitos modificados com silano um mecanismo de ligações químicas covalentes (COLOM et al., 2002).

BLEDZKI & FARUK (2004) prepararam compósitos com polipropileno e fibras de madeira curtas e longas. Diversos parâmetros foram analisados nas propriedades de absorção de umidade, resistência ao impacto e cisalhamento. Os principais resultados mostraram que o teor de umidade dos compósitos aumenta com o aumento da proporção de fibras, mas que o uso de um agente compatibilizante MAH-PP, na proporção de 5%, reduziu a higroscopicidade em torno de 75% para compósitos confeccionados com PP e fibras longas.

JOLY et al. (1996) também estudaram técnicas de graftização para melhorar a adesão interfacial entre fibras de celulose e PP. Num tratamento, a superfície das fibras de celulose foram graftizadas com PP por meio de um éster, que proporcionou segmentos de cadeia livres para co-cristalizar e permitir a ligação com a massa de PP. Um outro tratamento estudado foi a graftização de pequenos grupos alifáticos da superfície das fibras usando um uretano, o que diminuiu a higroscopicidade das fibras. Em geral, os dois tratamentos proporcionaram melhor adesão interfacial entre as fibras de celulose e PP, com conseqüente aumento das propriedades mecânicas dos compósitos.

STARK & MATUANA (2002) estudaram a fotodegradação de compósitos de HDPE e serragem de madeira, tratados com fotoestabilizantes, depois de envelhecimento acelerado que variou de 250 a 2000 horas. Foi verificado que as propriedades de resistência à flexão do HDPE puro são imediatamente afetadas pela exposição à luz ultravioleta, enquanto para os compósitos de HDPE e serragem isto não ocorre até 2000 horas de exposição. Os resultados também indicaram que o uso de corantes e de *ultraviolet absorbers* (UVA) foram mais efetivos que o uso de *hindered amine light stabilizers* (HALS), como fotoestabilizantes dos compósitos, após 2000 horas de exposição.

2.7 CRISTALINIDADE DA MATRIZ POLIMÉRICA

2.7.1 Índice de Cristalinidade

LUCAS et al. (2001) comentaram que nos materiais poliméricos semi-cristalinos, como o HDPE, encontram-se diferentes formas de organização molecular. Existem cadeias totalmente desorganizadas (amorfas) e cadeias organizadas (cristalinas). Nucleação é um processo em que o polímero orienta suas cadeias em sua própria conformação e se alinha em um perfeito arranjo tridimensional. Durante o crescimento dos cristais, as cadeias poliméricas se orientam em um arranjo tridimensional onde os núcleos formam um conjunto de cristais esféricos chamados esferulitos. A nucleação nos materiais poliméricos pode ser homogênea ou heterogênea. Uma cristalização homogênea ocorre a partir de super resfriamentos, já a heterogênea pode ocorrer na presença de agentes nucleantes ou cargas. Segundo NAGARAJAN (2000), os agentes nucleantes podem reduzir o tempo de ciclo em um processo de moldagem por injeção.

As propriedades térmicas e mecânicas dos polímeros semi-cristalinos podem ser melhoradas com o uso de agentes nucleantes e cargas. Além disso, as propriedades finais dos materiais poliméricos dependem fortemente da morfologia gerada durante o processamento (PAPAGEORGIU et al., 2005).

A relação entre a região amorfa e cristalina de um polímero pode ser expressa em termos do índice de cristalinidade (X_c). A variação dessa relação afeta diretamente as propriedades finais do material. A determinação da energia envolvida na fusão de um polímero pode ser medida por meio de um DSC. A integração da área relativa ao pico endotérmico fornece a entalpia de fusão (ΔH_f) do material. O quociente entre a amostra medida e um padrão de amostra que se considera 100% cristalina, fornece uma estimativa do índice de cristalinidade, conforme a Equação 1 (LUCAS et al., 2001).

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H^0} \quad (1)$$

2.7.2 Cristalinidade Relativa

A cristalização de um polímero a partir do estado fundido é usualmente acompanhada de uma significativa liberação de calor, podendo ser medida em um DSC. Baseado em que a evolução da cristalinidade é linearmente proporcional à evolução do calor durante a cristalização, a cristalinidade relativa (X_t) pode ser obtida com a integração da área sobre o pico exotérmico, a intervalos pré-determinados, de acordo com a Equação 2. Essa equação é usada para descrever uma cristalização não isotérmica, em função da temperatura de cristalização (T) (GAO et al., 2004; JAIN et al., 2005).

$$X_T = \frac{\int_{T_0}^T \left(\frac{dH_c}{dT}\right) dT}{\int_{T_0}^{T_\infty} \left(\frac{dH_c}{dT}\right) dT} \quad (2)$$

No qual dH_c / dT é a entalpia de cristalização medida em um intervalo infinitesimal dT . O limite de integração T_0 é a temperatura inicial de cristalização, T e T_∞ são a temperatura instantânea e final de cristalização. As temperaturas de cristalização podem ser convertidas em tempo de cristalização t usando a relação para um processo de cristalização não-isotérmico (Equação 3) (GAO et al., 2004; JAIN et al., 2005).

$$t = \frac{T_0 - T}{\phi} \quad (3)$$

No qual ϕ é a taxa de resfriamento utilizada no experimento. Os valores de cristalinidade relativa variam de 0 a 1.

2.8 PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM MADEIRA

2.8.1 Principais Processos de Preparação e Moldagem

RUCH et al. (2004) citam os principais processos para a preparação e moldagem de componentes confeccionados com materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras naturais, que são: extrusão, injeção, plastificação/prensagem, preparação de formulação/injeção e processo NMT (*naturfasermattenverstärkter*) que é utilizado para termoplásticos reforçados com mantas de fibras naturais.

Num trabalho para desenvolvimento de um processo para a preparação e moldagem de compósitos de polipropileno com fibras naturais, RUCH et al. (2004) verificaram ser possível a transformação direta dos materiais de partida num produto final, por meio de uma máquina para preparação de formulação e injeção, fabricada em Munique, na Alemanha. Nesse novo conceito de injetora, o conjunto êmbolo/rosca plastificadora foi substituído por uma extrusora com duas roscas girando no mesmo sentido, que dispõe também de um sistema intermediário para armazenamento. Esse equipamento permite que se faça a mistura e a injeção das peças numa só etapa, sendo adequado principalmente para a conformação de componentes com grandes áreas superficiais e paredes de pequena espessura, feitos de compósitos reforçados com fibras longas.

O mais comum, entretanto, são os processos de mistura e de conformação dos compósitos poliméricos reforçados com fibras celulósicas serem realizados em duas etapas. Numa primeira etapa se faz a incorporação das fibras à matriz, seguido de um processamento de moldagem do produto final. Diversos tipos de processos podem ser empregados em ambas as fases, mas existem uma tendência, tanto na indústria como no desenvolvimento de trabalhos científicos, de se utilizar a extrusão dos materiais em extrusora de dupla-roscas, seguido da injeção da mistura para obtenção do produto final (SAHEB & JOG, 1999).

É importante também ressaltar que o uso de diferentes métodos de processamento pode influenciar as propriedades físico-mecânicas dos compósitos.

STARK et al. (2003) afirmaram que diferentes métodos de produção de compósitos polímero-madeira, ocasionam diferentes características na face do material produzido. Num estudo do efeito do método de processamento no envelhecimento acelerado de compósitos de HDPE e serragem de madeira, os autores produziram amostras dos compósitos por injeção, por extrusão e por extrusão seguida de aplainamento do material. Observaram que os diferentes métodos de processamento produziram faces com diferentes componentes. O método de extrusão seguido de aplainamento, apresentou um material com maior quantidade do componente madeira na sua superfície, seguido da extrusão e injeção, respectivamente. Esse fato acarretou diferenças nas propriedades mecânicas dos compósitos, sendo que, aqueles com maior quantidade do componente madeira em sua superfície experimentaram uma maior perda percentual do MOE e da resistência à tração depois do envelhecimento.

BLEDZKI et al. (2005) estudaram o comportamento de compósitos confeccionados com PP e madeiras de coníferas e folhosas, submetidos a três diferentes formas de processamento das misturas. Misturador de rolos, misturador termocinético e extrusora de dupla-rosca foram usados para homogeneizar as misturas de PP com madeira. Foram também testados três tipos de agentes compatibilizantes. Foi verificado que dos três processos empregados, a extrusão proporcionou melhores propriedades mecânicas e valores mais baixos de absorção d'água nos compósitos. Uma análise por microscopia revelou danos aparentes nas fibras submetidas ao processamento por misturador de rolos e por misturador termocinético, mas, segundo os autores, esses danos não tiveram efeito negativo sobre as propriedades mecânicas do material.

CLEMONS & IBACH (2004) estudaram os efeitos do tipo de processamento de compósitos de HDPE reciclado reforçado com serragem de pinus, na resistência dos compósitos ao ataque de fungos e absorção de umidade. Os autores verificaram que os compósitos confeccionados por injeção foram mais resistentes em todos os aspectos que os compósitos confeccionados por compressão. Estes, por sua vez, foram mais resistentes que os compósitos confeccionados por extrusão.

2.8.2 Processo de Preparação por Extrusão

De acordo com BILLMEYER JR. (1971), no processo de extrusão o polímero é propelido continuamente ao longo de uma rosca com regiões de alta temperatura e pressão onde é fundido e compactado, sendo finalmente forçado por uma ferramenta para se obter um produto final. Para se obter a temperatura de fusão do polímero, algum calor externo é aplicado, mas grande parte do calor é gerada por fricção. Máquinas extrusoras modernas podem ser providas de dupla-rosca ou múltipla rosca, em que duas roscas giram lado a lado em direções opostas promovendo maior trabalho na massa fundida. Noutras, chamadas extrusoras com sistema de degasagem, existem aberturas ou saídas de ar em alguns pontos ao longo da rosca, para extração de voláteis do polímero fundido.

Para SCHNEIDER (2002), um fator importante para o desempenho econômico de uma linha de extrusão é o seu nível de produção. Segundo o autor, em meados da década de 1990 houve aumento da capacidade das extrusoras paralelas de rosca dupla, usadas na produção de perfis de PVC.

Segundo ROSE (2002), os maiores problemas encontrados para extrusão de compósitos polímeros-madeira são as características da serragem, como baixa densidade, fluxo não livre e alta absorção de umidade. Esse fato se agrava quando esses compósitos contém maior quantidade em peso de serragem do que de resina. Assim, o autor salienta que para extrusão de compósitos polímeros-madeira, o transporte e a mistura dos materiais necessitam de equipamentos diferentes dos utilizados para os plásticos convencionais.

Em TECNOLOGIA (2000) são transcritas as peculiaridades do processo de coextrusão de fibras de madeira e polímeros. Segundo o artigo, extrusoras de roscas duplas (contra-rotativas) podem ser usadas para compósitos com madeira quando sua umidade for inferior a 1%. Para umidades maiores e visando melhor homogeneização da mistura, devem ser usadas extrusoras projetadas para compósitos de polímeros com madeira, que podem remover a umidade das fibras, mesmo em níveis altos (8%). Existem duas diferenças básicas dessas extrusoras em relação às convencionais: que o processo inclui uma extrusora principal de dupla-rosca paralela contra-rotativa e outra satélite para o polímero e que as fibras de

madeira são submetidas a uma zona de vazão para remoção da umidade. Com esse tipo de equipamento, segundo o artigo, pode-se conseguir misturas com até 80% de proporção de serragem.

Sabe-se, no entanto, que é possível a mistura de menores proporções de madeira em compósitos utilizando extrusoras convencionais. Numa comparação entre diferentes processos e diferentes tipos de fibras de madeira na fabricação de compósitos com polipropileno, BLEDZKI et al (2005) verificaram que o processo de extrusão, numa extrusora de dupla-rosca, proporcionou melhores propriedades mecânicas e valores mais baixos de absorção d'água, que os processos de fabricação dos compósitos por misturador termocinético ou por misturador de rolos.

BALASURIYA & MAI (2001), estudaram as propriedades mecânicas de compósitos produzidos com dois tipos de HDPE, de baixo e médio índice de fluidez (MFI), misturados a partículas (*flakes*) de madeira de *Pinus radiata*, utilizando dois processos de mistura: com extrusora dupla-rosca co-rotacional e com misturador rotacional. Os autores concluíram que o processo tem influência nas propriedades mecânicas dos compósitos. O uso de uma extrusora dupla-rosca, de alto cisalhamento, proporcionou a confecção de compósitos com até 70% de madeira. Considerando a resistência à tração e à flexão, foram obtidos melhores materiais nas misturas realizadas por extrusão, utilizando HDPE de médio MFI, para os compósitos com até 50% de proporção de madeira. Isso mostra a vantagem da mistura por fusão em alto cisalhamento em relação a mistura termocinética, principalmente pela melhora no molhamento e distribuição das partículas de madeira.

2.9 RECICLAGEM DE POLÍMEROS

GORNI (2001) destaca que no ano de 1973, a produção mundial de plásticos supera a de aço, tomando como base o volume de material fabricado. Contrariamente, em 1974, ocorre o primeiro grande choque do petróleo após conflitos no Oriente Médio, afetando profundamente a indústria dos plásticos. O óleo cru sobe 300%, forçando um aumento de 200% no preço do etileno, o principal insumo da indústria petroquímica, e uma elevação de 50 a 100% no preço de

polímeros sintetizados por via petroquímica. Cresce o interesse pela reciclagem de plásticos que até então era paga pelos proprietários da sucata plástica. Depois de 1974 esse insumo passa a ser comprado pelos interessados.

A preocupação com a reciclagem dos polímeros torna-se assunto de máxima importância, uma vez que seu desenvolvimento e uso serão inviáveis caso esse problema não seja adequadamente resolvido. Começa a reciclagem em larga escala de garrafas de poliéster e polietileno de alta densidade (HDPE).

Nesse cenário, segundo MONTENEGRO et al. (2002) o HDPE ocupa posição relevante devido a sua alta aplicabilidade nas embalagens. Existe um crescimento maior da quantidade de HDPE reciclado nos EUA em relação aos outros polímeros, apesar de uma tendência futura de estabilização. Por outro lado, cabe destacar que é pequena a influência da reciclagem do HDPE em relação ao consumo total desta resina. O HDPE reciclado representou apenas 4% do HDPE virgem consumido na América do Norte em 1994.

Segundo BONELLI (1993), a reciclagem de plásticos pode ser dividida em quatro grandes grupos, segundo a fonte de material e a tecnologia empregada no processo: recuperações primárias, secundárias, terciárias e quaternárias.

De acordo com MILLER (2006), no Brasil, o maior mercado é o da reciclagem primária, que consiste na regeneração de um único tipo de resina separadamente. Este tipo de reciclagem absorve 5% do plástico consumido no país e é geralmente associada à produção industrial (pré-consumo). A reciclagem secundária apresenta um mercado crescente que é o de processamento de polímeros. Nesse caso estão incluídos os compósitos polímero-madeira, que podem ser confeccionados com a mistura de vários polímeros reciclados. Já a reciclagem terciária é a aplicação de processos químicos para recuperar as resinas que compõem os resíduos plásticos, fazendo-as voltar ao estágio químico inicial. A reciclagem quaternária, não usada no Brasil, consiste na transformação da energia química de ligação entre os átomos e moléculas dos polímeros e dos aditivos utilizados na fabricação dos produtos em energia térmica, pela incineração controlada do material plástico.

Em OS DESAFIOS (1999), De Paoli afirma que há um potencial tecnológico pronto para ser usado no Brasil na reciclagem de plásticos, principalmente nos processos de reciclagem mecânica ou secundária. Segundo o pesquisador, tanto

existem pesquisadores para desenvolver os processos, como existem empresas com capacidade para construir os equipamentos necessários para processar com qualidade o material reciclado.

Com relação à qualidade do material, CARASCHI & LEÃO (2002) trabalharam com uma mistura de plásticos reciclados provenientes dos resíduos sólidos urbanos do município de Botucatu, São Paulo, compostos principalmente por HDPE, LDPE, PP e PS. Embora os autores não tenham determinado a composição da mistura de plásticos utilizada para reciclagem, puderam concluir que essa mistura proporcionou peças injetadas com resistência à tração semelhante à do HDPE e resistência à flexão superior a esse polímero virgem. No mesmo trabalho, não foi encontrada influência da temperatura de injeção nessas mesmas propriedades mecânicas, na faixa de 180° C a 200° C. Para temperatura de 200° C, os autores ressaltam que já são encontrados indícios de degradação do material.

POWELL (1999), num trabalho sobre custos da reciclagem de plásticos, mostrou que *pellets* e *flakes* reciclados são entre 31% e 34% mais baratos que HDPE virgem.

2.10 APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS COM MADEIRA

Segundo WOLCOTT (2003), a concepção dos produtos fabricados a partir de compósitos madeira-plástico tem o custo como fator principal para aplicação em componentes estruturais e esses produtos são competitivos em custos de produção com produtos de madeira. O baixo custo de produção existe, embora sejam fabricados em escalas menores por extrusão, porque os investimentos em extrusoras e outros equipamentos são relativamente baixos comparados aos equipamentos necessários ao processamento da madeira.

Por outro lado, WOLCOTT (2003) salienta que o custo da matéria-prima para compósitos madeira-plástico é alto, comparado ao custo da madeira para muitos produtos. O componente termoplástico é o que mais contribui para o custo da matéria-prima. Dessa forma, o uso de plásticos reciclados deve ser preferido para uso nesses compósitos e o menor custo da matéria-prima reciclada deve ser

suficiente para superar a diferença de custo de material entre produtos de madeira e compósitos madeira-plástico.

ENGLISH (1997) destaca duas aplicações comerciais de termoplásticos reforçados com madeira que são para construções exteriores e para confecção de portas e janelas. Na categoria de materiais para uso externo, cita dois produtos fabricados comercialmente à época, um pela *Advance Environmental Recycling Technologies (AERT)* e o outro pela *Mobile Chemical Company*, que consistem basicamente numa mistura de 50% a 55% de fibras de madeira e o restante de HDPE ou LDPE. Esses materiais são utilizados para construção de convés, superfície de cais, móveis de jardim, mesas de piquenique, pisos industriais e outras aplicações.

Em UNIVERSIDADE (2004), se comenta que no Brasil ainda existem poucas aplicações comerciais de compósitos polímero-madeira. Existem algumas iniciativas isoladas de fabricação desses compósitos, desenvolvidas por pequenas empresas que, em geral, procuram adaptar a tecnologia existente para processamento de termoplásticos na fabricação de uma matéria-prima destinada a empresas que fabricam produtos por injeção. Também, existem iniciativas na fabricação de um produto final que pode ser processado por extrusão, injeção, compressão ou, ainda, uma combinação de dois ou três desses processos de transformação.

Segundo UNIVERSIDADE (2004) a empresa Plastnew Indústria de Plásticos Ltda, fundada em 29 de junho de 1998, em Bento Gonçalves, RS, trabalhou na fabricação de embalagens plásticas até dezembro de 2002 quando por intermediação da Universidade de Caxias do Sul e da Associação das Indústrias de Móveis do Estado do Rio Grande do Sul (MOVERGS), com tutela do Centro Gestor de Inovação (CGI) – Moveleiro, obteve um financiamento do BNDES para compra de máquinas e equipamentos visando trabalhar com misturas de poliolefinas com serragem, a partir de resíduos sólidos urbanos e da indústria moveleira.

Em março de 2004 a empresa inicia a comercialização de um novo produto fabricado a partir de resíduos de PP e resíduos de MDF. Esse produto, uma mistura de 50% de ambos os componentes, foi comercializado durante os anos de 2004 e 2005 quando a empresa encerrou as atividades. O produto era extrusado e vendido na forma de *pellets* para indústrias de transformação de termoplásticos por

compressão ou por injeção. As propriedades desse produto, obtidas a partir de corpos-de-prova injetados, são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 - PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO FABRICADOS PELA PLASTNEW INDÚSTRIA DE PLÁSTICOS LTDA

Propriedade	Unidade	Norma ASTM	HDPE Virgem*	50% fibras MDF
Densidade	g/cm ³	D792	0,95	1,04
Índice de Fluidez – MFI	g/10 min	D1238	até 20	0,70
Temperatura de Amolecimento VICAT – 5 kp	°C	D1525	-----	96
Temperatura de Amolecimento VICAT – 1 kp	°C	D1525	122 à 128	126
Resistência à Tração no Escoamento	Mpa	D638	18 à 45	19
Resistência à Tração na Ruptura	Mpa	D638	18 à 45	19
Módulo Elástico à Tração	Mpa	D638	-----	953
Alongamento no Escoamento	%	D638	6 à 10	3,8
Alongamento na Ruptura	%	D638	750 à 1000	3,8
Módulo Elástico à Flexão	Mpa	D790	1000 à 1600	1550
Resistência à Flexão	Mpa	D790	-----	30
Resistência ao Impacto IZOD	J/m	D256	entre 20 e 750	36
Dureza Shore D		D2240	entre 60 e 65	67

FONTE: UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL (2004).

* Valores médios encontrados em consulta à catálogos técnicos de produtos comerciais.

Segundo FONSECA (2005) a Fazenda da Esperança, situada na cidade paulista de Guaratinguetá, possui um sistema de produção de madeira plástica pelo processo de extrusão, por meio de uma extrusora doada pelo governo alemão à instituição Obra Social Nossa Senhora da Glória que trata recuperação de dependentes de drogas. Nesta instalação, resíduos plásticos de coleta seletiva e de origem industrial, e resíduos de madeira, são usados para extrusão de compósitos polímero-madeira que, por sua vez, na forma de chapas, são empregados para fabricação de produtos finais como mesas e bancos.

O autor comenta que os resíduos normalmente utilizados nesta planta são poliestireno de copos de iogurte descartados na produção, acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) oriundo de pára-choques e painéis de automóveis, polietileno de alta

(HDPE) e baixa densidade (LDPE) e polipropileno (PP) de embalagens. Na Figura 6 podem ser observados os produtos fabricados nessa planta industrial.

FIGURA 6 - MESA E BANCO FABRICADOS COM MADEIRA PLÁSTICA NA FAZENDA ESPERANÇA.



FONTE: FONSECA (2005)

Outra empresa, Única Termoplásticos Ltda, recentemente instalou-se na cidade de Bento Gonçalves com objetivo de produzir compósitos polímero-madeira com poliolefinas recicladas e resíduos de madeira oriundos da indústria moveleira. Conforme UNIVERSIDADE (2005), essa empresa firmou convênio de parceria com o Grupo de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul. O convênio tem por objetivos realizar experimentos com uso de diferentes tipos de resíduos de madeira e produzir corpos-de-prova por injeção para caracterização física e mecânica dos compósitos. A empresa iniciou, em 2006, a fabricação e comercialização de *pellets* dos compósitos polímero-madeira produzidos, para fabricação de produtos por injeção e compressão.

A empresa Pinhopó, sediada em Ponta Grossa, Paraná, comercializa serragem de madeira e fibras de outros materiais lignocelulósicos para uso em compósitos polímero-madeira. Segundo PINHOPÓ (2006), a farinha de madeira é utilizada pelas indústrias como carga, para redução de custos e para melhorar as

propriedades físicas dos produtos finais, nos segmentos de plásticos, como os de resinas, baquelites, PVC e colas. A empresa produz farinha de madeira para esses e outros diversos segmentos industriais desde 1976.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 FLUXOGRAMA DE TRABALHO

O desenvolvimento do trabalho foi planejado em três etapas principais, organizadas em seqüência de atividades que permitiriam alcançar os objetivos propostos.

A primeira fase foi realizada com base nos dados coletados no diagnóstico da geração de resíduos do polo moveleiro da serra Gaúcha, e consistiu na determinação dos tipos e quantidades de resíduos disponíveis para produção de compósitos polímero-madeira e na estimativa da geração de resíduo de madeira em função das variáveis de produção.

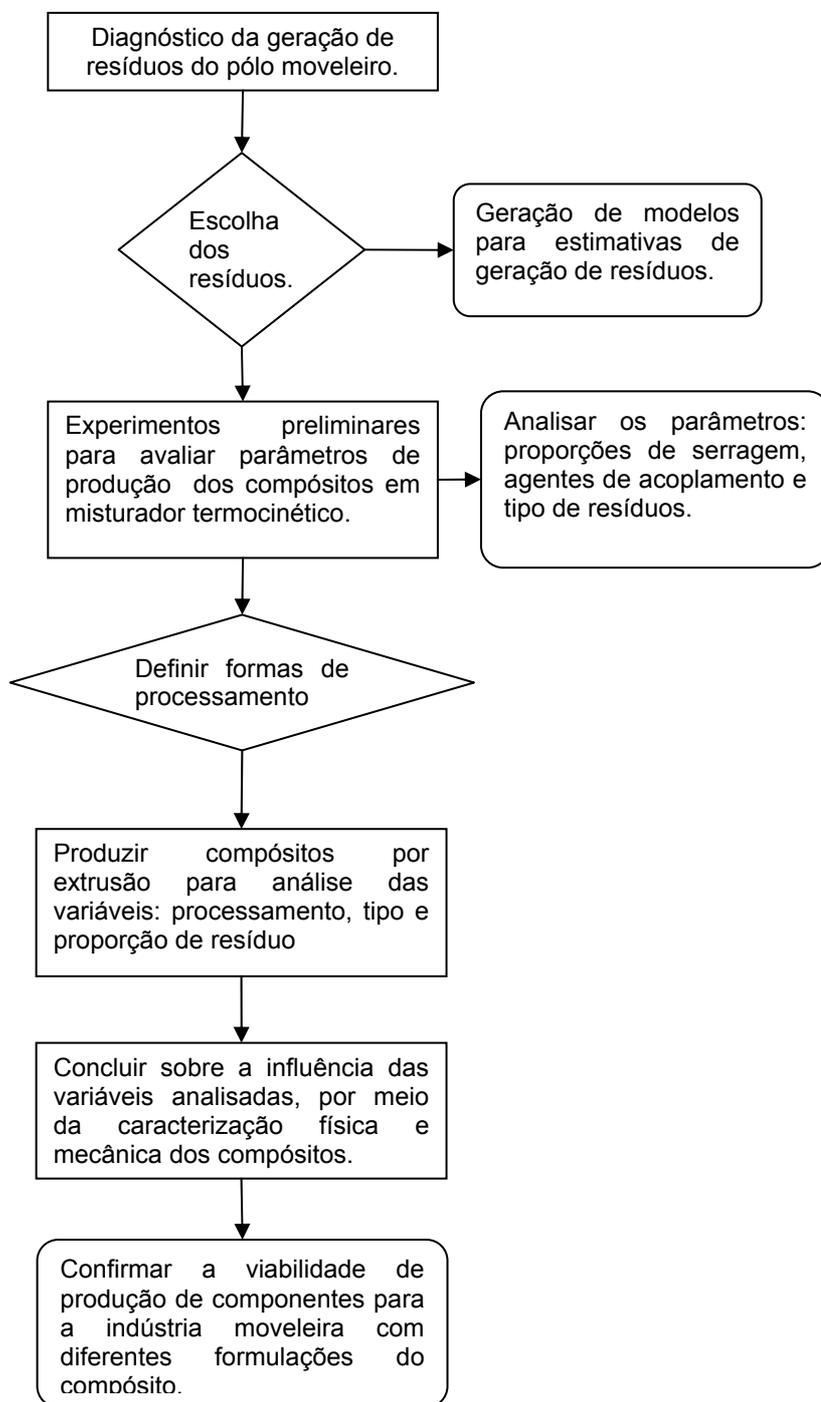
Na segunda fase, foram instalados três experimentos para análise de diferentes variáveis que influem no processo de confecção de compósitos polímero-madeira. Esses experimentos foram conduzidos com misturas realizadas num misturador termocinético tipo Drais.

Na terceira fase, foi instalado o experimento principal, com misturas realizadas por processo de extrusão. Nesse experimento, foi analisado o tipo de extrusora, o tipo de resíduo de madeira e a proporção de resíduo de madeira no compósito.

Para análise da influência dessas variáveis nos compósitos e para determinação da viabilidade de sua utilização em componentes para a indústria moveleira, foram realizados ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto. As misturas foram realizadas em extrusora, sendo o material extrusado na forma de “baguetes”. Após a extrusão do material, este foi moído em moinho de facas Marconi e levado à Injetora HIMACO LH 150 – 80, para confecção dos corpos-de-prova.

O fluxograma apresentado na Figura 7 apresenta cada etapa do presente trabalho.

FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DESENVOLVIDAS PARA O TRABALHO



FONTE: o Autor

3.2 DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO PÓLO MOVELEIRO

O diagnóstico da geração de resíduos do polo moveleiro da serra Gaúcha forneceu os dados para determinação dos tipos e quantidade de resíduos disponíveis para utilização em compósitos polímero-madeira. Esses dados, também serviram para testar modelos matemáticos, visando estimar a geração de resíduos de madeira em função de variáveis de produção. Essa análise, serviu de base para escolha dos tipos de serragem usadas nos experimentos, bem como fornece uma estimativa da disponibilidade de serragem por município.

3.2.1 Quantidade de Resíduo de Madeira e Derivados Disponíveis

Para estimativa das quantidades totais de resíduos gerados por classe de matéria-prima e tipo de resíduo, para cada município pesquisado, foram considerados as quantidades de matérias-primas utilizadas, seu aproveitamento e as quantidades de resíduos gerados. Utilizando os dados da Tabela 4 (seção 2.2.1), os volumes de serragem foram convertidos para massa por meio da densidade média a granel de cada tipo, e estendidos para a produção total do município, considerando a produção amostrada de cada município.

3.2.2 Estimativa da Quantidade de Resíduo de Madeira e Derivados Gerados, em Função das Variáveis de Produção

Na análise da geração de resíduos por empresa foi utilizada a técnica estatística multivariada de extração dos componentes principais, que possibilitou identificar as principais variáveis que apresentam similaridades em relação à geração de resíduos. Foram selecionadas para uso nessa análise 16 variáveis entre as pesquisadas, que foram:

- Consumo de madeira (m^3)
- Resíduo de madeira (m^3)
- Consumo de MDF (m^3)
- Resíduo de MDF (m^3)

- Consumo de Aglomerado (m³)
- Resíduo de aglomerado (m³)
- Consumo de compensado (m³)
- Resíduo de compensado (m³)
- Consumo de Matéria-Prima (m³)
- Número de colaboradores
- Número de máquinas
- Consumo de energia (Kw)
- Consumo de água (m³)
- Total de serragem (m³)
- Total de maravalhas (m³)
- Total de retalhos (m³)

Com base na análise multivariada, essas variáveis foram utilizadas para obter modelos de estimativa da quantidade de resíduo gerada, em função das variáveis de produção. Pelo método *stepwise*, foram selecionadas as variáveis que melhor se ajustam para estimativa por regressão linear dos resíduos de madeira, de MDF, de aglomerado e de compensado. Todas as análises estatísticas foram realizadas com software SPSS.

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Materiais Utilizados para Confeção dos Compósitos em Misturador Termocinético (Drais)

Foram obtidos resíduos de madeira de pinus (*Pinus taeda*) e de garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e resíduos de MDF, na forma de serragem provenientes de indústrias moveleiras e de base florestal da região de Caxias do Sul e de Bento Gonçalves. Esses resíduos foram usados em três experimentos realizados com misturador termocinético, juntamente com os seguintes materiais:

- Polietileno de alta densidade reciclado (r-HDPE), obtido de engradados, fornecido por uma empresa da região, na forma de *pellets* e acondicionados em sacas de 25 kg;
- Polietileno de alta densidade virgem (v-HDPE), fabricado pela Ipiranga Petroquímica, código HC 7260 LS, com densidade de 0,959 g/cm³, MFI de 8,00, indicado para uso em injeção de utilidades domésticas. A Tabela 6 apresenta a caracterização desse polímero;

TABELA 6- PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO v-HDPE UTILIZADO PARA CONFECCÃO DOS COMPÓSITOS.

Propriedade	Norma	Unidade	Valores
Densidade	ASTM D 792 - 98	g/cm ³	0,959 ± 0,003
MFI 190/2,16	ASTM D 1238 - 01	g/10 min	8,0 ± 1,6
Tensão no Escoamento (em placa)	ASTM D 638 - 02	Mpa	31
Alongamento no Escoamento (em placa)	ASTM D 638 - 02	%	7,2
Módulo de Flexão Secante a 2% (em placa)	ASTM D 790 - 02	Mpa	1100
Dureza Shore D/15	ASTM D 2240 - 03	-	65
Resistência ao Impacto IZOD a 23°C	ASTM D 256 - 03	J/m	35
Temperatura de Deflexão sob Carga a 455 kPa	ASTM D 648 - 04	°C	77
Temperatura de Amolecimento Vicat 9,8 N	ASTM D 1525 - 04	°C	126
ESCR (Cond. B, 100% Igepal)	ASTM D 1693 - 01	F50. h	5

FONTE: Boletim Técnico da IPIRANGA PETROQUÍMICA

- Polybond 3009 (HDPE maleinizado industrial). Conforme o fabricante, esse aditivo trata-se de um HDPE graftizado com anidrido maleico, recomendado como agente de acoplamento para vidro, mica, Alumina Trihidratada (ATH), fibras de madeira e outras fibras usadas em compósitos com polietileno. Também é recomendado como compatibilizante para blendas de polietileno com polímeros polares como nylon e EVOH. As propriedades físicas que caracterizam esse produto são apresentadas na Tabela 7.

TABELA 7 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO POLYBOND 3009

Propriedades	Valores médios	Método de determinação
Forma física	Pellets	
Índice de fluidez (190/2.16)	5 g/10 min.	ASTM D 1238
Densidade (23° C)	0,95 g/cm ³	ASTM D 792
Conteúdo de anidrido maleico	1% em peso	
Temperatura de fusão	127° C	DSC

FONTE: Boletim Técnico da CHENTURA CORPORATION

- Polietileno de alta densidade graftizado em laboratório (g-HDPE); Esse material foi produzido no laboratório de polímeros da Universidade de Caxias do Sul, utilizando os materiais descritos na seção 3.3.2.

3.3.2 Materiais Utilizados para Produção do Polietileno de Alta Densidade Graftizado (g-HDPE) em Laboratório

Para produção do g-HDPE foi usado anidrido maleico (AM) e peróxido de dicumila (PD). O AM foi obtido da empresa VETEC QUIMICA FINA LTDA e suas especificações são apresentadas na Tabela 8.

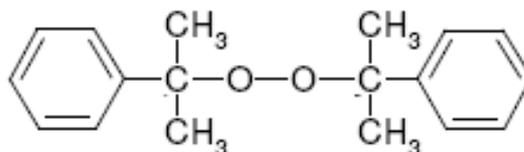
TABELA 8 – PROPRIEDADES DO ANIDRIDO MALEICO (AM)

Propriedades	Valores médios
Massa molar (g/mol)	98,06
Densidade (g/cm ³)	1,48
Calor específico	0,285
Ponto de Fusão (°C)	50,53

FONTE: VETEC QUIMICA FINA LTDA

O peróxido de dicumila foi utilizado como iniciador do processo de funcionalização e foi fornecido pela Aldrich Chemical Company JNC. A estrutura química desse peróxido é apresentada na Figura 8 enquanto suas propriedades são apresentadas na Tabela 9.

FIGURA 8 – ESTRUTURA QUÍMICA DO PERÓXIDO DE DICUMILA



FONTE: O autor

TABELA 9 – PROPRIEDADES DO PERÓXIDO DE DICUMILA

Propriedades	Valores médios
Massa molar (g/mol)	270,34
Pureza (%)	98
Ponto de Fusão (°C)	39 a 41
Ponto de flamabilidade	≥ 230

FONTE: ALDRICH CHEMICAL COMPANY JNC

3.3.2 Materiais Utilizados para Confeção dos Compósitos em Extrusora

Foram utilizados resíduos de madeiras de pinus (*Pinus taeda*), de madeiras de eucalipto (*Eucalyptus grandis*), de aglomerados e de MDF. Os resíduos de pinus e de MDF foram obtidos na forma de serragem, respectivamente das operações de corte com serra de fita e com serra circular. Como não foi possível obter serragem pura de eucalipto e de aglomerado, essas serragens foram geradas num moinho de martelo (Figura 9), a partir de cavacos de eucalipto e de retalhos de aglomerados.

A madeira de eucalipto foi obtida numa indústria de celulose, com tamanho variando entre 2 a 4 cm de comprimento e 1 a 2 cm de largura. Os retalhos de aglomerados (revestidos) foram obtidos numa indústria de móveis da região e seu tamanho variou entre 8 a 12 cm de comprimento e 2 a 4 cm de largura. No laboratório de polímeros da Universidade de Caxias do Sul, os retalhos de chapas aglomeradas foram reduzidos a dimensões de aproximadamente 4 cm de comprimento, numa serra de fita, para possibilitar seu processamento no moinho de martelos.

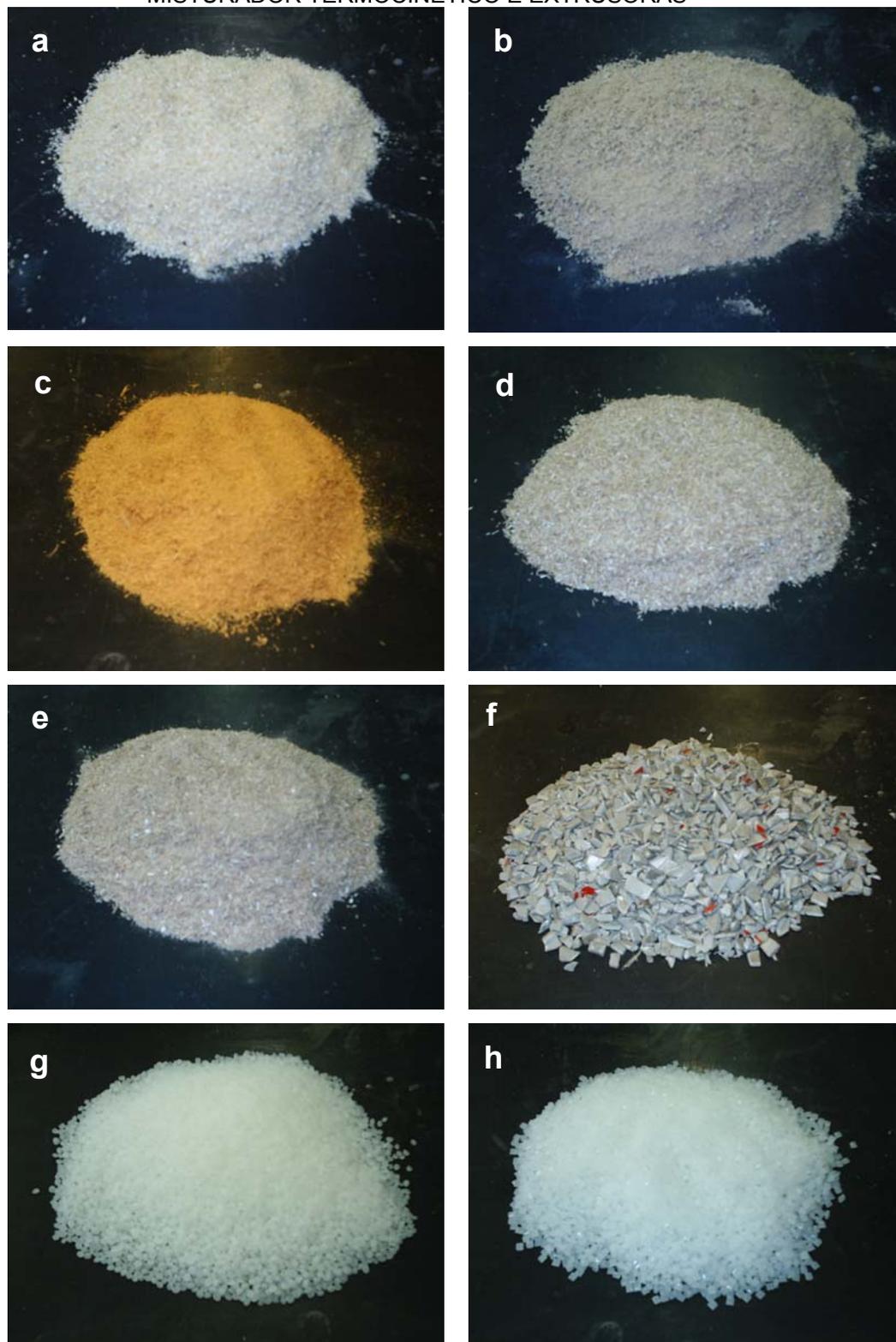
FIGURA 9 - MOINHO DE MARTELOS UTILIZADO PARA GERAÇÃO DE “SERRAGEM” DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* E DE CHAPAS AGLOMERADAS.



FONTE: O autor

Na fase matricial dos compósitos foi usado v-HDPE (HC 7260 LS - Tabela 6), da Ipiranga Petroquímica. O agente de acoplamento de nome comercial Polybond 3009 (3.3.1 - Tabela 7), foi utilizado para melhorar a interação entre a fase de fibra e de matriz. A Figura 10 mostra os diferentes tipos de materiais utilizados para confecção dos compósitos em misturador termocinético e extrusoras.

FIGURA 10 - MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONFEÇÃO DOS COMPÓSITOS EM MISTURADOR TERMOCINÉTICO E EXTRUSORAS



FONTE: O autor

a = SERRAGEM DE *Pinus taeda*; b = SERRAGEM DE MDF; c = SERRAGEM DE *Apuleia leiocarpa*; d = SERRAGEM DE *Eucalyptus grandis*; e = SERRAGEM DE Aglomerado; f = r-HDPE; g = v-HDPE; h = Polybond 3009.

3.3.3 Caracterização dos Diferentes Tipos de Serragem Utilizadas nos Experimentos

A caracterização dos diferentes tipos de serragem utilizadas nos experimentos com misturador tipo Drais e com extrusoras, foi realizada utilizando-se análise granulométrica, análise termogravimétrica (TGA), termogravimetria derivativa (DTG) e calorimetria diferencial de varredura (DSC).

3.3.3.1 Caracterização granulométrica

A caracterização granulométrica das amostras de madeira foi realizada utilizando peneiras da série Tyler (série fina), com peneiras variando de 8 Mesh Tyler até 400 Mesh Tyler. O ensaio foi realizado com auxílio de um agitador mecânico da Produtest durante um período de 20 minutos.

3.3.3.2 Análise termogravimétrica

As análises termogravimétricas (TGA e DTG) das amostras de madeira foram realizadas em um equipamento Shimadzu, modelo TGA-50 com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, sob atmosfera de nitrogênio, com um fluxo de $50\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. As condições de ensaio foram da temperatura ambiente até 900°C , com as massas das amostras variando entre 10 a 15 mg.

3.3.3.3 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

As amostras com massas variando entre 9 e 10 mg foram submetidas ao ensaio calorimétrico em um equipamento DSC-50 da Shimadzu, sob atmosfera de nitrogênio, com um fluxo de $50\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 200°C , a velocidade de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e mantidas durante aproximadamente 5 minutos, após foram resfriadas a $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até a temperatura ambiente e mantidas em uma isoterma por um período de 5 minutos. Para o segundo ciclo de aquecimento as amostras foram submetidas às mesmas condições adotadas no primeiro aquecimento. Para esta análise utilizou-se índio e zinco

metálico para a calibração da energia e temperatura, sendo que considerou-se apenas o primeiro ciclo de aquecimento.

3.4 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS POLÍMERO-MADEIRA

3.4.1 Produção dos Compósitos Polímero-Madeira com Misturador Termocinético Tipo Drais

A serragem foi colocada em estufa para secagem, por 24 horas a 65°C, alcançando umidade de 3%. O r-HDPE, em forma de grânulos, foi utilizado conforme recebido da empresa fornecedora. Após, os componentes foram pesados proporcionalmente e colocados em um homogenizador termocinético do tipo Drais (Figura 11), para obter uma mistura homogênea. Para confecção de placas por compressão, foi usada uma prensa hidráulica marca Schulz PHS com capacidade de 15 toneladas (Figura 12) ou uma prensa hidráulica adaptada para prensagem de polímeros termoplásticos (Figura 13). As misturas foram usadas em quantidade (massa) suficiente para preenchimento do molde de dimensões de 150 x 150 x 3 mm, a 20 kgf.cm⁻², 160°C e tempo de prensagem de 15 min. Em seguida o material foi submetido à prensagem a frio até seu total resfriamento.

FIGURA 11 - MISTURADOR TERMOCINÉTICO TIPO DRAIS COM DETALHE DA CÂMARA DE MISTURA



FONTE: O autor

FIGURA 12 - PRENSA SCHULZ COM MOLDE DE 150 X 150 X 3 mm, PARA CONFEÇÃO DAS PLACAS (EXPERIMENTOS I E II)



FONTE: O autor

FIGURA 13 - PRENSA HIDRÁULICA ADAPTADA PARA Prensagem DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS, COM MOLDE DE 150 X 150 X 3 mm (EXPERIMENTO III)

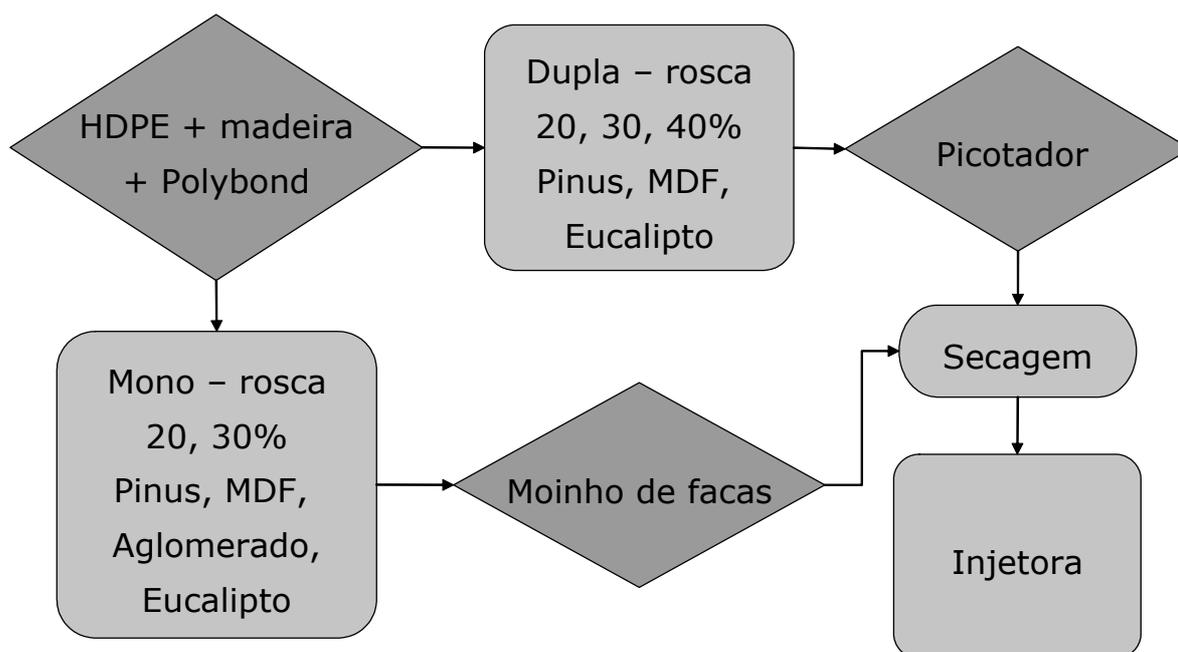


FONTE: O autor

3.4.2 Produção dos Compósitos Polímero-Madeira por Extrusão

Tendo em vista que um dos parâmetros analisados foi o tipo de processo de mistura empregado, foram realizadas misturas em extrusora mono-rosca e dupla-rosca co-rotacional. Os diferentes tipos de serragem, em diferentes proporções, foram incorporados ao HDPE, juntamente com 5% em peso do agente de acoplamento Polybond 3009, por meio dos dois tipos de extrusora. Após a extrusão, o material na forma de grânulos foi seco em estufa para depois ser levado à injetora. A Figura 14 apresenta o fluxograma esquemático da produção dos compósitos por extrusão.

FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS POR EXTRUSÃO



FONTE: O autor

Na extrusão com mono-rosca, a mistura de HDPE/serragem/Polybond e a alimentação da extrusora foram realizadas manualmente. Utilizou-se uma extrusora Seibt (Figura 15), com rosca de 35 mm (Figura 16) e temperaturas de 160°C, 170°C e 180°C nas zonas 1, 2 e 3 respectivamente, segundo descreve GRISON (2004). A velocidade de rotação foi ajustada em 34 rpm, com vazão de aproximadamente 6 kg/h.

FIGURA 15 - EXTRUSORA MONO-ROSCA, MARCA SEIBT, UTILIZADA PARA MISTURA DOS COMPÓSITOS



FONTE: O autor

FIGURA 16 - PERFIL DA ROSCA UTILIZADA NA EXTRUSÃO COM MONO-ROSCA



FONTE: O autor

Na extrusão com dupla-roscas, a mistura HDPE/serragem/Polybond também foi realizada manualmente e a alimentação foi realizada com um dosador gravimétrico. Utilizou-se uma extrusora Baker & Perkins (Figura 17) com diâmetro de rosca (Figura 18) de 19 mm e razão comprimento/diâmetro (L/D) de 25. Foram

usadas temperaturas de 180°C nas cinco zonas de aquecimento, rotação de 150 rpm e vazão de 1 kg/h.

FIGURA 17 - EXTRUSORA DUPLA-ROSCA, BAKER & PERKINS, UTILIZADA PARA MISTURA DOS COMPOSTOS



FONTE: O autor

FIGURA 18 - PERFIL DA ROSCA UTILIZADA NA EXTRUSÃO COM DUPLA ROSCA



FONTE: O autor

O material extrusado em dupla-rosca foi transformado em *pellets* com picotador, após resfriamento em água na saída da extrusora, e acondicionado em sacos plásticos. O material extrusado em mono-rosca, após resfriamento em água, foi moído em moinho de facas e também acondicionado em sacos plásticos para o processamento seguinte de injeção dos corpos-de-prova. Na injeção das misturas, em injetora HIMACO-150, foram usados os parâmetros apresentados na Tabela 10. A Figura 19 apresenta a injetora utilizada para confecção dos corpos-de-prova.

TABELA 10 - PARÂMETROS DE INJEÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Parâmetro	Unidade	Valor	Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura do bico	°C	90	Força de injeção	ton	50
Temperatura da zona 1	°C	180	Força de recalque	ton	20
Temperatura da zona 2	°C	170	Força de dosagem	ton	90
Temperatura da zona 3	°C	160	Força de descompressão	ton	70
Tempo de injeção	s	5	Tempo de resfriamento	s	15

FONTE: O autor

FIGURA 19 - INJETORA HIMACO UTILIZADA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA POR INJEÇÃO



FONTE: O autor

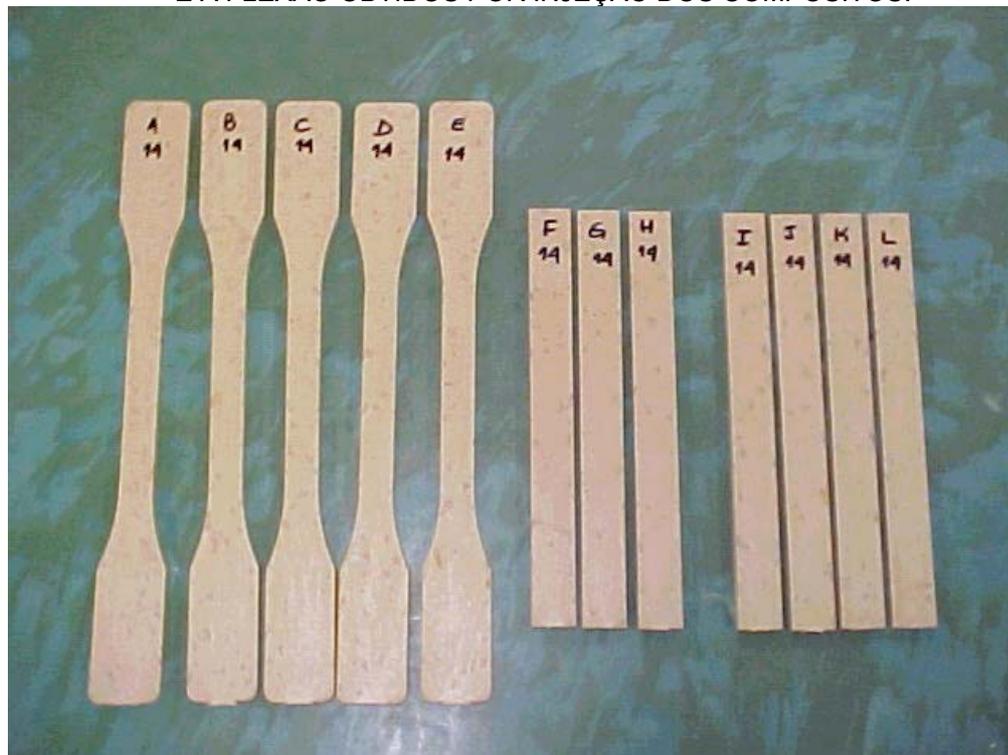
3.5 CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

3.5.1 Confeção dos Corpos-de-Prova

A confecção dos corpos-de-prova das placas produzidas por compressão (processo de mistura com Drais) foi realizada por usinagem, num centro de usinagem com controle numérico computadorizado (CNC) do Laboratório de Tecnologia e Pesquisa da Universidade de Caxias do Sul. Um modelo de corte com desenho dos corpos-de-prova, segundo as normas ASTM D638 para resistência à tração e ASTM D790 para resistência à flexão estática, serviu de base para programação da máquina CNC. A usinagem foi efetuada com fresa de 120 mm de diâmetro e 5 dentes, calçados com metal duro. Desses corpos-de-prova foram retiradas sub-amostras, que permitiram a confecção dos corpos-de-prova para os ensaios de resistência ao impacto e dureza, segundo as normas ASTM D256 e ASTM D2240, respectivamente.

A confecção dos corpos-de-prova por injeção foi realizada por meio de uma ferramenta de injeção, também segundo as mesmas normas ASTM e de acordo com os parâmetros de injeção descritos em 3.4.2. A Figura 20 mostra os corpos-de-prova injetados para os ensaios de tração e de flexão estática. Após a confecção, os corpos-de-prova foram condicionados em sala climatizada, a temperatura de 20°C e 50% de umidade relativa, para realização dos ensaios mecânicos e determinação da densidade.

FIGURA 20 – CORPOS-DE-PROVA DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À FLEXÃO OBTIDOS POR INJEÇÃO DOS COMPÓSITOS.



FONTE: O autor

3.5.2 Caracterização e Ensaio Físico-Mecânico dos Corpos-de-Prova Confeccionados com Misturador Termocinético (Drais)

No primeiro experimento, onde foram utilizadas diferentes misturas de v-HDPE, r-HDPE e serragem de *Pinus taeda*, obteve-se corpos de prova de cada chapa para realização de ensaios de resistência à tração, resistência ao impacto, resistência à flexão estática e dureza Shore A, segundo as normas ASTM D638, ASTM D256, ASTM D790, ASTM D2240, respectivamente. Também foi determinada a densidade dos compósitos por medição e pesagem dos corpos-de-prova.

No segundo experimento, para analisar a eficácia dos agentes de acoplamento (g-HDPE e Polybond 3009), foram realizados ensaios de resistência à tração e de resistência à flexão, segundo as mesmas normas (ASTM D638 e ASTM D790).

Foram também realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura (SEM) em microscópio eletrônico marca JEOL, modelo ISM – 5800 do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, com ampliações de 200 e 750 vezes, e 20 KV de

energia de feixe incidente. As amostras foram imersas em nitrogênio líquido por 5 minutos e fraturadas por impacto. A superfície fraturada foi recoberta por uma camada de ouro e as amostras foram coladas em suportes individualizados confeccionados com aço inoxidável, no formato de pequenos cilindros com 1,2 cm de diâmetro por 1 cm de altura.

No terceiro experimento, com misturas obtidas de diferentes tipos de serragem, foram realizados ensaios de resistência à tração, à flexão e ao impacto e ensaios de dureza. Da mesma forma que no experimento de misturas de v-HDPE, r-HDPE e serragem, os ensaios seguiram as recomendações das normas ASTM D638, ASTM D790, ASTM D256 e ASTM D2240. Também, foram calculadas as densidades de cada corpo de prova, pelo método de volume de água deslocado e utilizando-se a Equação 4. Três corpos-de-prova de cada placa foram utilizados para determinação da densidade.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Onde:

ρ = Densidade;

m = Massa do compósito;

v = Volume do compósito, correspondente à massa de água deslocada.

No ensaio de resistência à tração, foi determinada a resistência à tração na força máxima. No ensaio de resistência à flexão, foram determinados a resistência à flexão e o alongamento na força máxima, além de ser efetuado o cálculo do Módulo de Elasticidade (MOE). Nos dois ensaios, foram confeccionadas duas placas de cada mistura e testados três corpos-de-prova de cada placa, sendo registrado o desvio-padrão.

O ensaio de resistência ao impacto tipo IZOD com entalhe, foi realizado numa máquina modelo CEAST, com martelo de quatro joules e velocidade de impacto de 3,46 m/s. Nesse ensaio foram testados nove corpos-de-prova de cada placa e também foi registrado o desvio-padrão entre eles. Os ensaios de dureza SHORE A

foram realizados em equipamento Pantec, com carga de 1Kg e foi realizado um ensaio para cada placa.

3.5.3 Caracterização e Ensaio Físico-Mecânicos dos Corpos-de-Prova Confeccionados com Misturas Extrusadas

Para verificação da influência dos tratamentos nas propriedades mecânicas dos compósitos injetados, foram realizados testes de resistência à tração, de resistência à flexão e de resistência ao impacto. Os ensaios seguiram as normas ASTM D 638, ASTM D790 e ASTM D256, respectivamente. Também foram determinadas as densidades dos compósitos, por meio de medição e pesagem de cinco corpos-de-prova de tração. Os corpos-de-prova foram acondicionados em sala climatizada, a 20° C e 50% de umidade relativa, por 48 horas, segundo as respectivas normas.

A caracterização física dos compósitos foi realizada por meio de ensaios adicionais de DSC, em equipamento DSC-50 Shimadzu. Foram analisados os índices de cristalinidade e a cristalinidade relativa das misturas dos diferentes tipos de serragem, na proporção de 30% serragem e 70% HDPE.

Para análise da dispersão da serragem na matriz polimérica, realizou-se microscopia eletrônica de varredura (SEM), em microscópio eletrônico marca JEOL, modelo ISM – 5800 do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, com ampliações variando entre 200 e 10000 vezes, e 20 KV de energia de feixe incidente. As amostras foram preparadas da mesma forma que as amostras do terceiro experimento com misturador tipo Drais (3.5.2).

3.6 MODELOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados três experimentos preliminares para análise dos parâmetros que influenciam no processo de confecção dos compósitos com misturador tipo Drais: o primeiro para determinação das propriedades físico-mecânicas de diferentes misturas de v-HDPE, r-HDPE e serragem; o segundo para determinar a eficácia do uso de agentes de acoplamento, sendo comparadas as

performances do agente comercial POLYBOND 3009 e de um agente desenvolvido no laboratório a base de HDPE graftizado com anidrido maleico e peróxido de dicumila; o terceiro para analisar a influência do uso de diferentes tipos de resíduos nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos.

Por fim, foi realizado um experimento principal para análise dos parâmetros que influenciam no processo de confecção dos compósitos por extrusão. Avaliou-se o processo empregado, a proporção de serragem e o tipo de serragem. Nesse experimento, utilizou-se dois tipos de extrusoras. Os modelos experimentais de cada um desses experimentos são apresentados em detalhes nos itens 3.6.1 e 3.6.2.

3.6.1 Experimentos com Misturador Termocinético

No Experimento I, utilizou-se do método de modelagem de misturas para analisar a influência de cada componente de uma mistura de três componentes. O objetivo foi determinar a influência do uso do r-HDPE (reciclado), do v-HDPE (virgem) e da serragem de *Pinus taeda* nas propriedades de cada mistura. A Tabela 11 apresenta a caracterização de cada mistura utilizada no modelo experimental do Experimento I. Nesse experimento, foram confeccionadas três placas de cada mistura.

TABELA 11 - CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE r-HDPE, v-HDPE E SERRAGEM DE *Pinus taeda* USADAS NO EXPERIMENTO I

Mistura ¹	v-HDPE ² (%)	Serragem ² (%)	r-HDPE ² (%)
1	100	0	0
2	50	0	50
3	0	0	100
4	33,3	33,3	33,3
5	0	50	50
6	50	50	0
7	12,5	75	12,5

FONTE: O autor

NOTAS: ¹ Três placas de cada mistura

² Proporção com base na massa seca de cada componente

Na modelagem de misturas, segundo NETO et al. (2001), duas considerações são importantes: as propriedades da mistura são determinadas pelas

proporções de seus componentes e as proporções dos componentes são dependentes. Em geral, para a modelagem de misturas, podem ser utilizados modelos lineares, quadráticos ou cúbicos que usam o mesmo número de ensaios que o número de coeficientes que se quer estimar. Este método, conhecido como “planejamento em rede simplex”, é utilizado principalmente para misturas de três componentes. Nesse caso, devido à particularidade da mistura ternária ser representada apenas por uma mistura, o planejamento é conhecido como “centróide simplex”.

No Experimento II utilizou-se o agente de acoplamento a base de anidrido maleico de nome comercial Polybond 3009 e o outro agente produzido no laboratório de polímeros da Universidade de Caxias do Sul que consistiu num polietileno maleinizado (g-HDPE). Os agentes foram utilizados em proporção de 5% sobre o peso total das misturas de diferentes proporções de serragem e r-HDPE. Também foram confeccionadas placas sem agente de acoplamento e foram realizadas duas repetições. A Tabela 12 apresenta o modelo experimental, com as diferentes proporções de serragem e r-HDPE reciclado utilizadas.

TABELA 12 - CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE r-HDPE, SERRAGEM DE *Pinus taeda*, g-HDPE E POLYBOND USADAS NO EXPERIMENTO II

Mistura ¹	Serragem (%) ²	r-HDPE (%) ²	Tipo de Agente
1	20	80	s/agente
2	40	60	
3	60	40	
4	20	80	g-HDPE
5	40	60	
6	60	40	
7	20	80	Polybond
8	40	60	
9	60	40	

FONTE: O autor

NOTAS: ¹ Duas placas de cada mistura

² Proporção com base na massa seca de cada componente

Caracterizou-se assim, um experimento fatorial. Para análise dos resultados, realizou-se análise de variância para os fatores estudados (tipo de agente de acoplamento e proporção de serragem) em relação às variáveis respostas, visando

determinar se houve diferença significativa entre eles. Após complementou-se com teste de Tukey para determinar quais níveis dos fatores diferem entre si.

No Experimento III, com misturador termocinético tipo Drais, o objetivo foi verificar a influência do uso de serragem de diferentes tipos nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos confeccionados com r-HDPE. Foi usada serragem de *Pinus taeda*, de *Apuleia leiocarpa* (garapeira) e de MDF. Para cada tipo de serragem foram usadas diferentes proporções de serragem / polímero. Instalou-se assim, um experimento fatorial com dois fatores e duas repetições (Tabela 13).

TABELA 13 - CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE r-HDPE, E DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM USADAS NO EXPERIMENTO III

Mistura ¹	Serragem (%) ²	r-HDPE (%) ²	Tipo de Serragem
1	20	80	<i>Pinus taeda</i>
2	40	60	
3	60	40	
4	20	80	<i>Apuleia leiocarpa</i>
5	40	60	
6	60	40	
7	20	80	MDF
8	40	60	
9	60	40	

FONTE: O autor

NOTAS: ¹ Duas placas de cada mistura

² Proporção com base na massa seca de cada componente

3.6.2 Experimento com Misturas Extrusadas

Visando limitar o Experimento IV a um máximo de 16 misturas mais o uso do v-HDPE puro, foi realizado um experimento fatorial incompleto, no delineamento inteiramente casualizado, variando os fatores: tipo de serragem, proporção de serragem e tipo de processo de extrusão/injeção. Utilizou-se serragem de *Eucalyptus grandis*, de *Pinus taeda*, de painéis aglomerados e de MDF, nas proporções de 20, 30 e 40%. Os compósitos foram extrusados em extrusora mono-rosca e em extrusora dupla-rosca co-rotante, para após serem injetados no formato de corpos-de-prova. Também foram injetados corpos-de-prova com v-HDPE puro,

sendo nesse caso o processo denominado de injeção. Foram analisados os diferentes fatores individualmente e a interação entre aqueles que o modelo permitiu. O modelo experimental com a caracterização das 16 misturas mais v-HDPE puro é apresentado na Tabela 14.

TABELA 14 - CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE v-HDPE E DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM, POR DOIS PROCESSOS DE EXTRUSÃO MAIS A INJEÇÃO DE v-HDPE PURO, USADOS NO EXPERIMENTO IV

Mistura ¹	Tipo de Serragem / v-HDPE	Proporção de Serragem ² (%)	Processo
0	v-HDPE puro	0	Injeção
1	Serragem de MDF	20	Dupla rosca
2			Mono rosca
3		30	Dupla rosca
4			Mono rosca
5		40	Dupla rosca
6	Serragem de aglomerado	20	Mono rosca
7		30	Mono rosca
8	Serragem de Eucalipto	20	Dupla rosca
9			Mono rosca
10		30	Dupla rosca
11			Mono rosca
12	Serragem de Pinus	20	Dupla rosca
13			Mono rosca
14		30	Dupla rosca
15			Mono rosca
16		40	Dupla rosca

FONTE: O autor

NOTAS: ¹Cinco corpos-de-prova de cada mistura e do v-HDPE puro

²Proporção com base na massa seca de cada componente

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO PÓLO MOVELEIRO

4.1.1 Estimativa da Quantidade de Serragem Gerada por Município

A Tabela 15 apresenta a estimativa da quantidade mensal de serragem gerada, por município e por classe de matéria-prima, expressa em massa (toneladas) ao teor de umidade de equilíbrio. Verifica-se que existe uma quantidade significativa de serragem de madeira serrada, de aglomerado e de MDF, em todos os municípios pesquisados com exceção de Caxias do Sul. Por exemplo, a quantidade de resíduo de MDF gerada em Bento Gonçalves, se usada em compósitos com HDPE na proporção de 30%, pode fornecer matéria-prima para produção de 470,25 toneladas de compósitos reforçados por mês.

TABELA 15 - QUANTIDADE MENSAL ESTIMADA DE SERRAGEM GERADA PELA INDÚSTRIA MOVELEIRA EM CADA UM DOS MUNICÍPIOS PESQUISADOS

Município	Madeira (ton)	MDF (ton)	Aglomerado (ton)	Compensado (ton)
Bento Gonçalves	416,34	141,08	975,20	10,59
Caxias do Sul	211,68	4,27	3,98	43,48
Flores da Cunha	727,92	98,48	122,34	3,72
Lagoa Vermelha	25,06	88,16	107,59	0,89
Total	1381,00	331,99	1209,11	58,68

4.1.2 Modelos para Estimativa da Geração de Resíduos em Função das Variáveis de Produção

Das variáveis diagnosticadas, foram selecionadas 16 e aplicado o método fatorial de análise multivariada para extração dos componentes principais. A Tabela 16 apresenta a variância explicada pelo cálculo dos autovalores de cada um dos componentes resultantes, realizado pelo software SPSS. Verifica-se que existe

similaridade entre as variáveis selecionadas, pois apenas cinco componentes principais explicam 91,05% da variância total entre as variáveis selecionadas.

TABELA 16 - VARIÂNCIA TOTAL EXPLICADA POR CADA UM DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DERIVADOS DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS

Componente	Variância Explicada		
	Autovalor	Variância (%)	Variância acumulada (%)
1	6,955	43,467	43,467
2	2,648	16,550	60,017
3	2,051	12,817	72,834
4	1,688	10,551	83,385
5	1,226	7,665	91,050
6	0,567	3,541	94,591
7	0,406	2,536	97,127
8	0,205	1,281	98,408
9	0,077	0,484	98,892
10	0,063	0,392	99,284
11	0,053	0,329	99,613
12	0,025	0,156	99,769
13	0,024	0,150	99,919
14	0,011	0,071	99,990
15	0,002	0,010	100,000
16	$1,534 \times 10^{-7}$	$9,588 \times 10^{-7}$	100,000

Na Tabela 17 são apresentadas as variáveis selecionadas e seus carregamentos em cada um dos cinco componentes principais extraídos. É possível verificar que o componente 1 apresenta a maioria das variáveis com valores de carregamentos acima de 0,500. Esse fato mostra que, embora as indústrias de móveis constituam um universo que abrange diversas matérias-primas e diferentes processos de produção, quase todas as variáveis selecionadas tem um alto valor de carregamento no componente 1, que pode ser denominado de componente porte da empresa.

TABELA 17 - CARREGAMENTOS ESTIMADOS DE CADA VARIÁVEL SELECIONADA EM CADA UM DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDOS

Variável	Componente				
	1	2	3	4	5
Consumo de madeira (m ³)	0,555	0,629	0,037	-0,170	0,431
Resíduo de madeira (m ³)	0,516	0,622	0,033	-0,202	0,471
Consumo de MDF (m ³)	0,428	-0,149	-0,158	0,841	0,060
Resíduo de MDF (m ³)	0,538	-0,049	-0,162	0,810	0,042
Consumo de Aglomerado (m ³)	0,709	-0,632	-0,030	-0,269	0,031
Resíduo de aglomerado (m ³)	0,751	-0,589	-0,045	-0,228	0,011
Consumo de compensado (m ³)	0,031	-0,025	0,989	0,136	0,005
Resíduo de compensado (m ³)	0,030	-0,023	0,989	0,135	0,007
Consumo de MP* (m ³)	0,846	-0,460	0,117	0,042	0,130
Número de colaboradores	0,969	0,059	0,112	-0,055	-0,069
Número de máquinas	0,646	0,270	0,060	-0,150	-0,607
Consumo de energia (Kw)	0,810	0,013	-0,011	-0,068	-0,105
Consumo de água (m ³)	0,750	0,360	-0,035	-0,068	-0,513
Total de serragem (m ³)	0,818	0,291	-0,049	0,052	-0,101
Total de maravalhas (m ³)	0,620	0,542	-0,058	0,120	0,176
Total de retalhos (m ³)	0,704	-0,546	-0,031	-0,199	0,327

NOTAS: Consumo de MP = representa a soma dos consumos de madeira, aglomerado, MDF e compensado de cada uma das empresas.

Os outros componentes principais da Tabela 17 mostram similaridades entre as variáveis que representam o tipo de matéria-prima consumida e a respectiva geração de resíduos dessa matéria-prima e também separam os componentes pelo tipo de matéria-prima consumida. No componente principal 2, os maiores carregamentos são para consumo de madeira, resíduos de madeira e total de maravalhas. Esse componente pode ser denominado fator matéria-prima madeira e se refere às empresas que trabalham com madeira serrada. Da mesma forma, os componentes principais 3 e 4 se referem aos fatores compensado e MDF, respectivamente. O componente cinco, por fim, não apresenta valores de carregamentos maiores que 0,500, mas se destacam variáveis como o consumo de madeira e resíduos de madeira.

O componente principal um, que foi denominado porte da empresa, têm como variáveis principais o número de colaboradores, o consumo de matéria-prima e o consumo de energia. Todas as outras variáveis, com exceção do consumo de compensado e do resíduo de compensado, possuem carregamentos significativos nesse componente. A matéria-prima com maior carregamento é o aglomerado e a geração de serragem é mais significativa que a geração de retalhos e de maravalhas.

Isso mostra que a principal matéria-prima utilizada pelas indústrias é o aglomerado, o qual se encontra presente com larga faixa de participação nas indústrias de maior porte. As empresas de maior porte, embora poucas, são responsáveis por grande parte do faturamento do setor e, em consequência, pela geração de grande parcela dos resíduos. A análise concorda com os fatos verificados no trabalho de ALIEVE & VARGAS (2002), que caracterizaram o arranjo moveleiro da serra Gaúcha com uma amostra de 19 empresas pesquisadas. Os autores citam que, embora no cadastro da FIERGS existam 227 empresas localizadas nos municípios pesquisados, as 19 empresas representam 30% de todo o faturamento da indústria moveleira gaúcha. Em HIERARQUIA (2000), verifica-se que apenas uma empresa foi responsável naquele ano por aproximadamente 16% da representatividade das empresas moveleiras de Bento Gonçalves.

Por essas razões, não foi apropriado fazer uma classificação por um método de agrupamento (por exemplo *Cluster*), o que seria mais comum numa análise multivariada. Seria obtido um ou dois grupos e provavelmente apenas um deles apresentaria características homogêneas.

A análise da Tabela 17 ainda mostra que o consumo de MDF e o resíduo de MDF, embora tenham um carregamento maior no componente 4, possuem um carregamento significativo no componente 1. Isso vale também para as variáveis consumo de madeira e resíduo de madeira, que no seu caso possuem um carregamento maior no componente 2. Esse fato decorre de que a maioria das empresas não utiliza apenas uma matéria-prima. Principalmente as empresas que tem como matéria-prima principal o aglomerado, utilizam também o MDF e/ou a madeira serrada. Os componentes principais 2 e 4 na verdade representam as empresas que tem como principal matéria-prima esses materiais. Em relação ao uso

do compensado essa afirmação não é válida e, por isso, as variáveis consumo de compensado e resíduo de compensado tem carregamentos significativos apenas no componente 3.

Com base nessas análises, foram testados modelos de equações de regressão linear que fornecessem estimativas da quantidade de resíduos gerados nas empresas em função das variáveis de produção. A Tabela 18 apresenta os modelos gerados pelo método *stepwise*, que exclui as variáveis que não possuem uma correlação significativa em cada um dos modelos testados.

TABELA 18 - MODELOS PARA ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA E DE SEUS DERIVADOS, OBTIDOS PELO MÉTODO STEPWISE DE REGRESSÃO LINEAR

Mod.	Variável dependente	Equação	R ²	S _{yx}	F
1	Resíduo de madeira	RESM = -3,571 + 0,532 MAD	0,886	29,85	717
2	Resíduo de compensado	RESC = 0,074 + 0,050 COMP	0,997	0,67	28609
3	Resíduo de MDF	RESMDF = -0,915 + 0,050 MDF + 0,052 COL - 0,002 MP - 0,088 MAQ + 0,028 ÁGUA - 1,725 . 10 ⁻⁵ ENER	0,920	6,24	179
4	Resíduo de aglomerado	RESAGL = -0,035 + 0,049 AGLO + 5,788 . 10 ⁻⁵ ENER	0,937	14,11	694

NOTAS: MOD = MODELO, RESM = Resíduo de madeira, RESC = Resíduo de compensado, RESMDF = Resíduo de MDF, RESAGL = Resíduo de aglomerado, MAD = Consumo de madeira, COMP = Consumo de compensado, MDF = Consumo de compensado, COL = Número de colaboradores, MP = Consumo de matéria-prima total, MAQ = Número de máquinas, ÁGUA = Consumo de água, ENER = Consumo de energia.

As equações de regressão linear obtidas, além de servirem para estimativa da geração de resíduos em indústrias moveleiras, complementam as informações obtidas pela análise multivariada. Para os resíduos de madeira e para os resíduos de compensados, a inclusão das variáveis de produção não proporcionou melhora na precisão da estimativa. A estimativa da geração de resíduos de madeira apresentou um coeficiente de determinação (R²) mais baixo que o apresentado para os outros tipos de matérias-primas e um alto erro padrão da estimativa (S_{yx}). Esse fato decorre da maior variabilidade que existe nas técnicas de processamento da madeira serrada e das diferentes espécies que são usadas no pólo moveleiro, que causam uma maior variabilidade dos percentuais de aproveitamento obtidos por cada empresa.

Por outro lado, a estimativa dos resíduos de compensados apresentou um R^2 próximo de um e um erro padrão da estimativa próximo de zero, mostrando que as empresas que trabalham com essa matéria-prima são homogêneas em relação aos processos utilizados e aos aproveitamentos obtidos.

Ao contrário dos anteriores, o modelo para estimativa dos resíduos de MDF inclui todas as variáveis de produção testadas, mostrando que sua utilização melhora a precisão da estimativa. Isso mostra que essas variáveis têm influência na quantidade de resíduos de MDF gerados. É possível verificar também que a quantidade de resíduos de MDF gerados por cada empresa aumenta com o aumento do número de colaboradores e com o aumento do consumo de água. Ao contrário, diminui com o aumento da quantidade de matéria-prima total utilizada, com o aumento do número de máquinas e com o aumento da quantidade de energia consumida. Pode-se inferir que as maiores empresas geram maior quantidade proporcional de resíduos de MDF e que nas empresas com maior nível de automatização ocorre o inverso.

Por fim, o modelo para estimativa da quantidade de resíduo de aglomerado gerado inclui, além da quantidade de matéria-prima consumida, o consumo de energia. Essa variável, de certa forma, expressa o porte da empresa e por isso sua inclusão no modelo melhora a precisão da estimativa. Outras variáveis também expressam o porte da empresa como o número de empregados, mas o consumo de energia é um fator ligado diretamente ao setor produtivo. Aqui também fica ratificado que existe homogeneidade entre os percentuais de aproveitamento das chapas aglomeradas verificados nas empresas.

Na Tabela 19 são apresentadas as equações para estimativa da quantidade de resíduos gerados em função da quantidade de matéria-prima consumida para cada tipo de matéria-prima, separados por município. Nas Figura 21 e Figura 22 são apresentados os gráficos que representam essas estimativas.

É possível verificar que existe homogeneidade entre os percentuais de aproveitamento das empresas, considerando os tipos de matéria-prima separadamente, em cada município. Apenas três situações apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) para a regressão inferior a 0,85.

No município de Lagoa Vermelha o ajuste para madeira apresentou um R^2 de 0,32 e para MDF de 0,75. Esse fato decorre de existir no município muitas empresas pequenas, com pouco consumo de madeira serrada, que informaram percentuais de aproveitamento mais altos que a média geral verificada para esse tipo de matéria-prima. Assim, a média de aproveitamento da madeira serrada nesse município foi de 88,38% contra uma média geral de 66,51% (Tabela 2).

No município de Bento Gonçalves, o R^2 do ajuste para MDF foi de 0,70. Nesse caso, embora a média de aproveitamento das empresas do município tenha sido semelhante à média geral, ocorreu uma maior dispersão dos percentuais de aproveitamento de cada empresa, que variaram de 85% a 98%. Assim, nesse município, pode-se inferir que o ajuste apresenta um erro padrão da estimativa maior.

TABELA 19 - REGRESSÃO LINEAR DA ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA E DE SEUS DERIVADOS EM FUNÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA CONSUMIDA PARA CADA MUNICÍPIO

Município	Variável dependente	Equação	R^2	S_{yx}	F
Bento Gonçalves	Resíduo de madeira	RESM = -0,222 + 0,311 MAD	0,981	8,238	1369
	Resíduo de MDF	RESMDF = 1,357 + 0,039 MDF	0,701	8,127	58
	Resíduo de aglomerado	RESAGL = 6,889 + 0,052 AGLO	0,922	27,265	292
	Resíduo de compensado	RESC = 0,004 + 0,050 COMP	0,999	0,078	17083
Caxias do Sul	Resíduo de madeira	RESM = -0,212 + 0,288 MAD	0,884	23,332	260
	Resíduo de MDF	RESMDF = -0,026 + 0,083 MDF	0,869	0,374	219
	Resíduo de aglomerado	RESAGL = 0,019 + 0,050 AGLO	0,995	0,084	6884
	Resíduo de compensado	RESC = 0,079 + 0,050 COMP	0,997	1,065	11214
Flores da Cunha	Resíduo de madeira	RESM = -9,358 + 0,417 MAD	0,807	57,061	118
	Resíduo de MDF	RESMDF = -0,662 + 0,079 MDF	0,848	12,586	67
	Resíduo de aglomerado	RESAGL = -1,407 + 0,098 AGLO	0,977	4,774	521
	Resíduo de compensado	RESC = 0,035 + 0,110 COMP	0,903	0,269	112
Lagoa Vermelha	Resíduo de madeira	RESM = 0,763 + 0,043 MAD	0,320	3,407	7,53
	Resíduo de MDF	RESMDF = 0,157 + 0,050 MDF	0,966	7,221	4,61
	Resíduo de aglomerado	RESAGL = 0,320 + 0,050 AGLO	0,997	1,551	4854
	Resíduo de compensado	RESC = 0,024 + 0,062 COMP	0,748	0,184	47

NOTAS: RESM = Resíduo de madeira, RESC = Resíduo de compensado, RESMDF = Resíduo de MDF, RESAGL = Resíduo de aglomerado, MAD = Consumo de madeira, MDF = Consumo de MDF, AGLO = Consumo de aglomerado, COMP = Consumo de compensado.

FIGURA 21 - QUANTIDADE DE RESÍDUO DE MADEIRA (A) E DE MDF (B), EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE MATÉRIA-PRIMA CONSUMIDA, COM A LINHA DE REGRESSÃO LINEAR AJUSTADA POR MUNICÍPIO

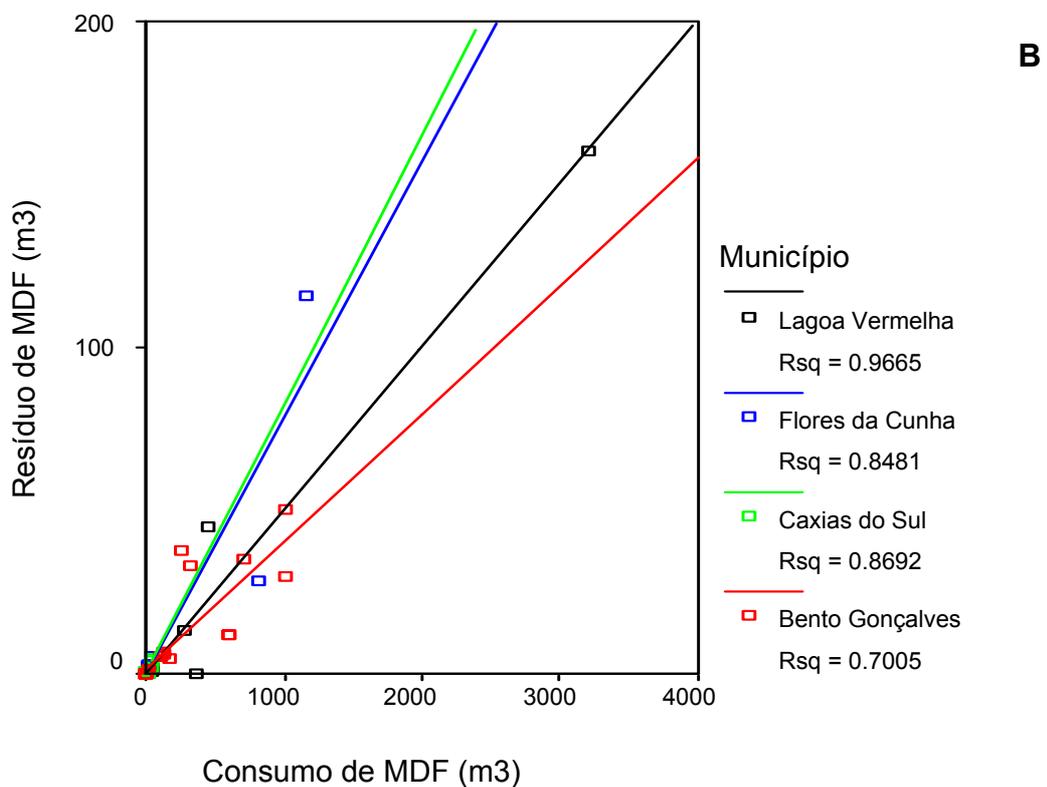
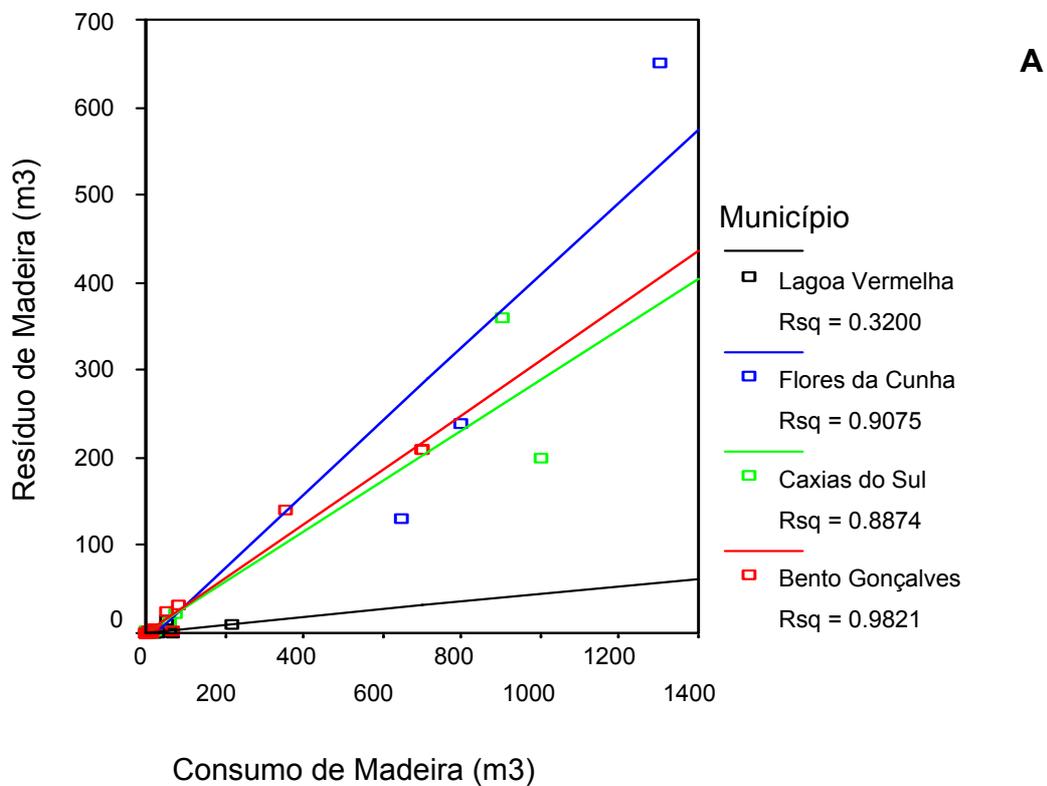
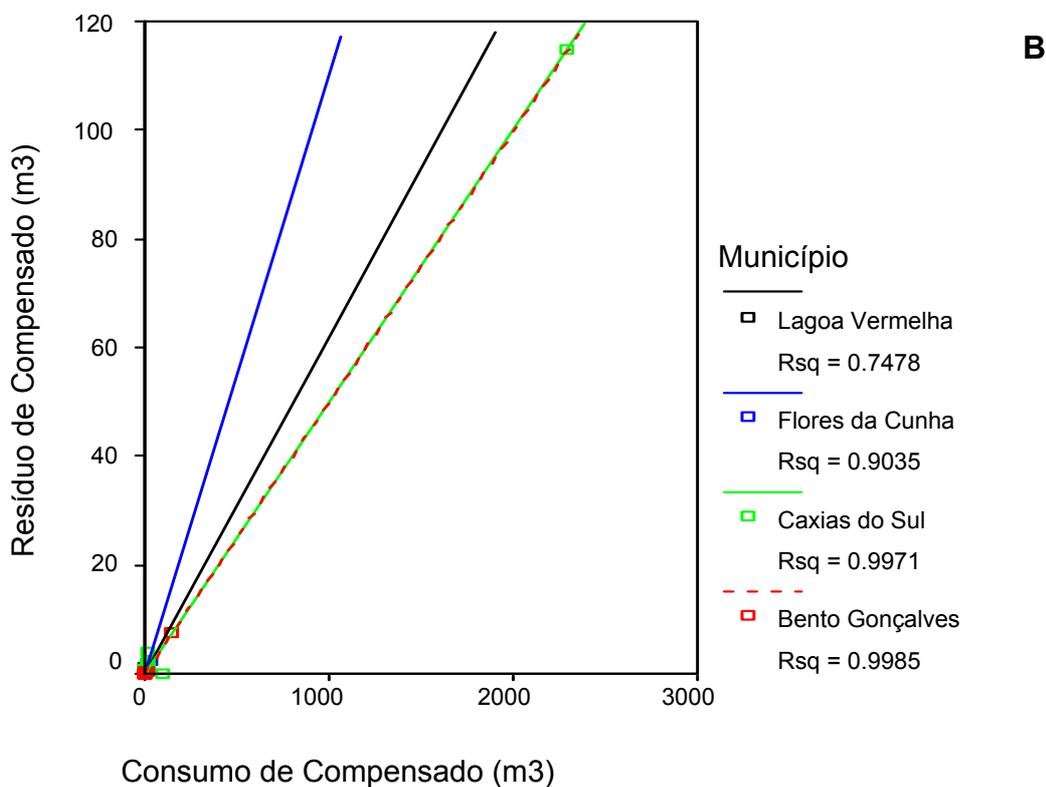
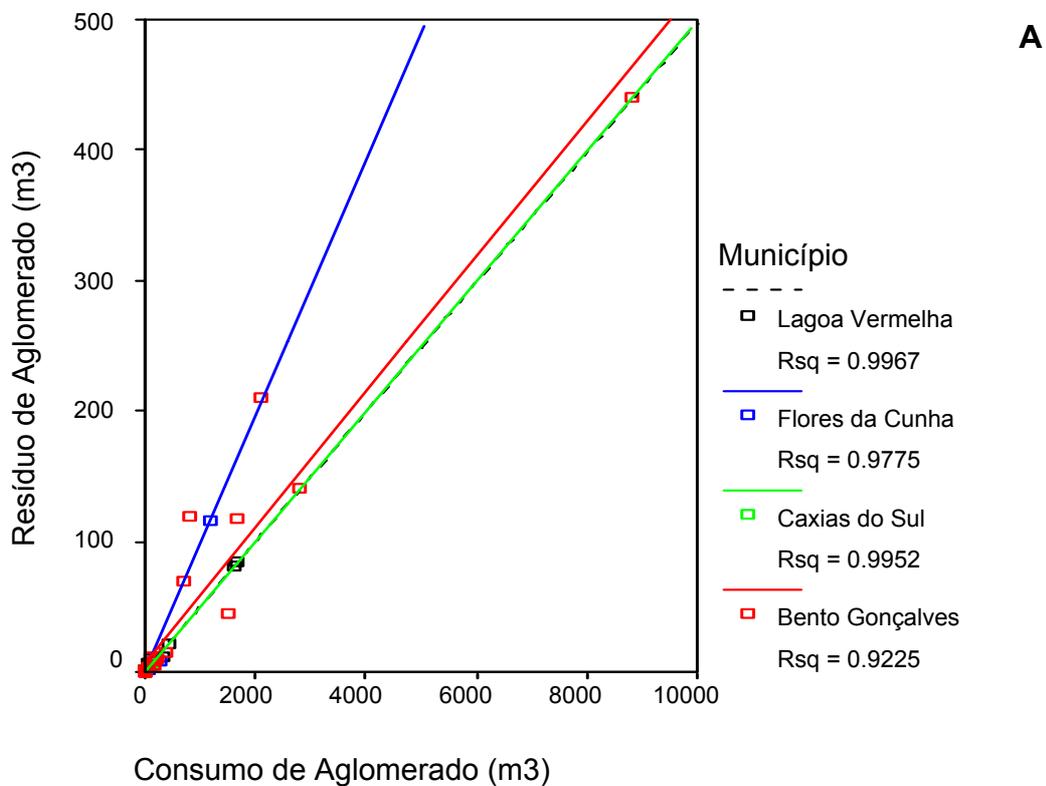


FIGURA 22 - QUANTIDADE DE RESÍDUO DE AGLOMERADO (A) E DE COMPENSADO (B), EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE MATÉRIA-PRIMA CONSUMIDA, COM A LINHA DE REGRESSÃO LINEAR AJUSTADA POR MUNICÍPIO



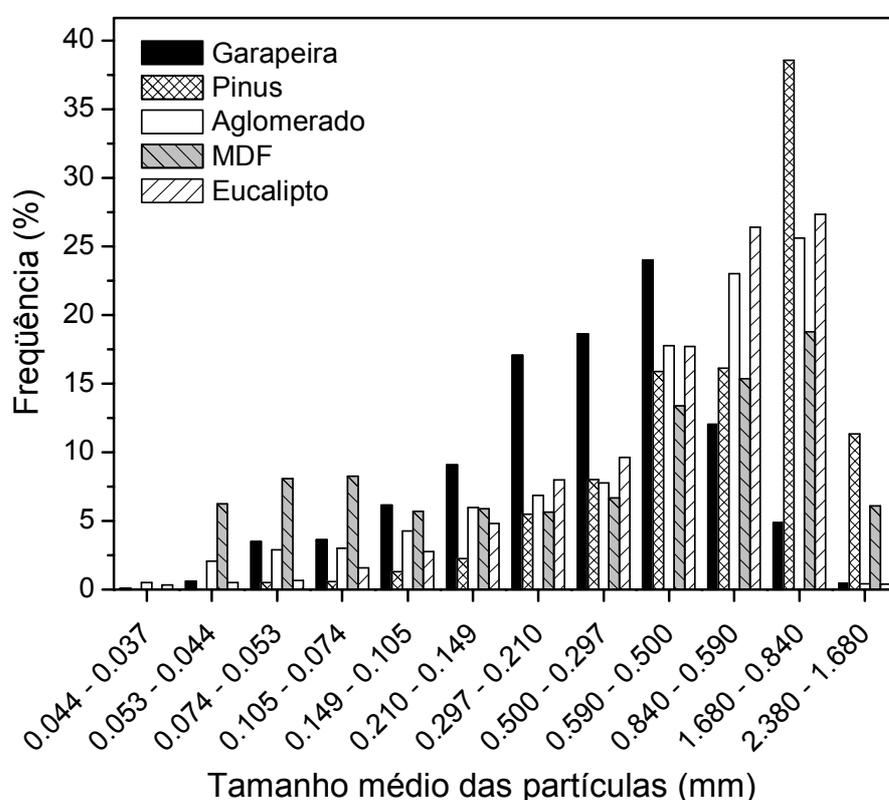
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SERRAGENS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS

4.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica dos diferentes tipos de serragens utilizados nos experimentos mostra que a distribuição do tamanho das partículas varia de um tipo de serragem para outro. A Figura 23 apresenta a frequência média de cada tamanho de partícula para cada tipo de serragem usada.

Verifica-se que a serragem de MDF é a que apresenta uma distribuição por tamanho mais heterogênea, em comparação com os outros tipos, apresentando um percentual de frequência significativo em todas as classes de tamanho. Por ordem de heterogeneidade de distribuição de frequência, seguem as serragens de aglomerado, de eucalipto e de pinus.

FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO TAMANHO MÉDIO DAS PARTÍCULAS, DOS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGENS USADAS NOS EXPERIMENTOS



A serragem de MDF é proveniente das indústrias de móveis, a partir das operações de seccionamento, fresamento e lixamento das chapas para obtenção de componentes de móveis. Dessa forma, o uso de diferentes ferramentas acaba por produzir partículas de diferentes tamanhos, o que ocasiona uma distribuição de frequência em diferentes classes de tamanho.

A serragem de Garapeira, embora também obtida de uma indústria de móveis, apresenta uma frequência maior em classes de tamanho de partículas menores do que a serragem de pinus e também do que os outros tipos de serragem. Para essa espécie, a maior frequência de tamanho se situou entre as classes de 0,149 mm e 0,500 mm, fato atribuído ao tipo de processo empregado para essa madeira.

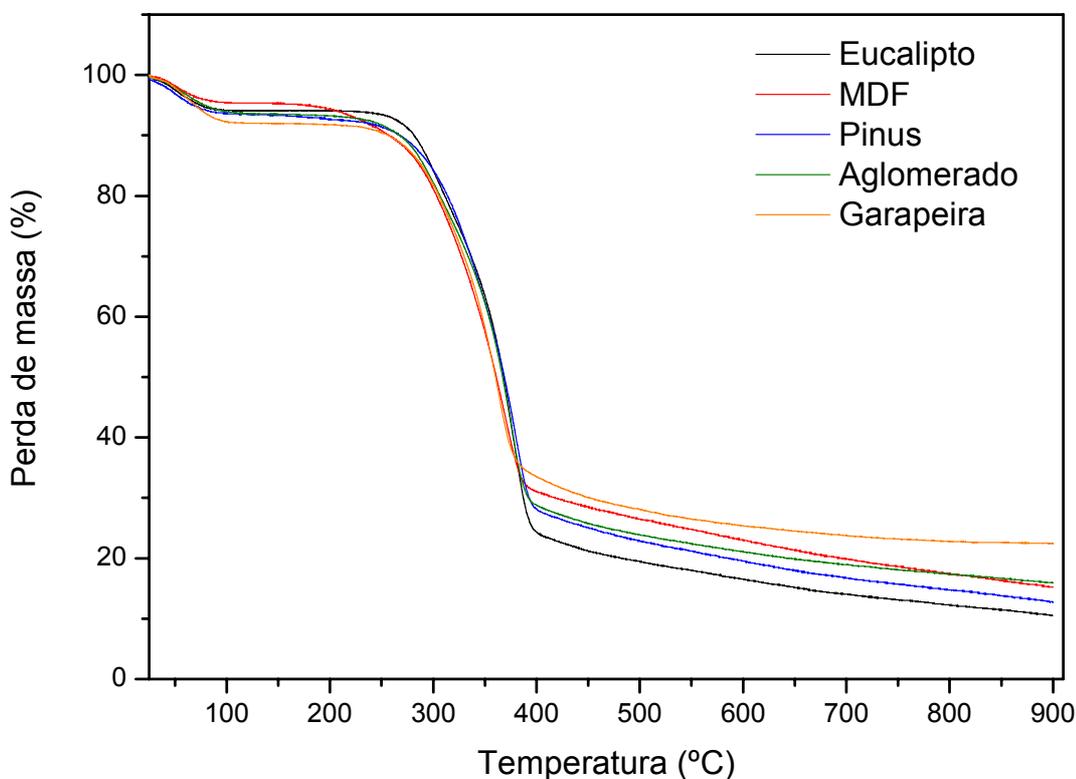
As serragens de aglomerado e de eucalipto foram geradas no laboratório, a partir de retalhos de chapas aglomeradas e de cavacos de madeira de eucalipto. Esses retalhos e cavacos foram picados em moinho de martelos, produzindo assim partículas mais homogêneas em tamanho que se situaram principalmente nas classes compreendidas entre 0,210 mm e 1,680 mm.

As partículas de pinus foram obtidas de uma serraria da região, a partir do desdobro de toras em serra de fita. Por essa razão, a frequência por tamanho se situa quase toda na faixa entre 0,210 mm e 2,380 mm, com uma frequência de quase 40% em apenas uma classe de tamanho (0,840 mm a 1,680 mm).

4.2.2 Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivativa (DTG)

A Figura 24 apresenta a perda percentual de massa das amostras de serragem das madeiras utilizadas nos experimentos em função da temperatura. Nota-se que as curvas, para cada tipo de serragem, apresentaram-se semelhantes, com faixas de temperatura de perda de massa muito próximas. Por outro lado, as perdas de massa de cada tipo de serragem apresentaram diferenças, que foram maiores especialmente na fase de estabilização da perda de massa, após a fase de degradação, ou seja, acima de 400° C.

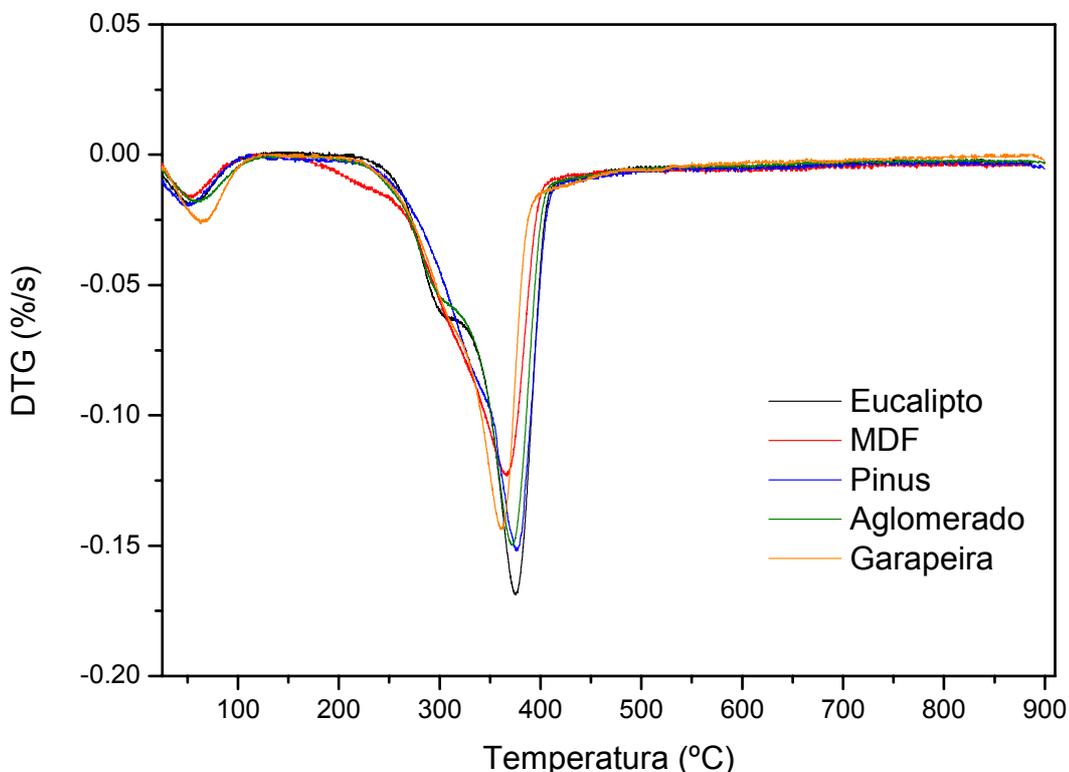
FIGURA 24 - TGA DAS AMOSTRAS DOS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS



Visando determinar as temperaturas de início, fim e máximas de decomposição das amostras, permitindo caracterizar cada estágio de degradação térmica foram obtidas as curvas de DTG, em função da temperatura, que são apresentadas na Figura 25.

Observa-se que houve sobreposição dos estágios de degradação, o que foi atribuído aos diferentes componentes da madeira se degradarem em faixas de temperaturas sobrepostas. Segundo GAO et al. (2004) a celulose inicia a perda de massa em temperaturas principalmente abaixo de 300° C e mais rapidamente completa seu ciclo de perda até carbonização, tendo a maior quantidade de voláteis de todos os componentes da madeira. Por outro lado, lignina e hemicelulose se decompõem em menores frações e tem maior perda de massa até a carbonização, embora a perda de massa desses componentes da madeira inicie em temperaturas mais baixas que a da celulose.

FIGURA 25 - DTG DAS AMOSTRAS DOS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS



BARTKOWIAK & ZAKRZEWSKI (2004) comentam que a lignina é termicamente mais resistente que os carboidratos componentes da madeira. Em temperaturas até 600° C a perda de massa da hemicelulose alcança cerca de 95%, para celulose esse percentual fica em torno de 80%, enquanto para lignina não excede 60%. KIM et al. (2004) encontraram resultados de análises termogravimétricas em casca de arroz condizentes com os valores teóricos de decomposição térmica de materiais lignocelulósicos, que ocorre entre temperaturas de 150° C a 500° C. Hemicelulose degrada principalmente entre 150° C e 350° C, celulose entre 275° C e 350° C e lignina entre 250° C e 500° C.

Como forma de separar os estágios de degradação da segunda perda de massa observada nas amostras de serragem, pode-se utilizar um método matemático para a deconvolução dos mesmos. O modelo escolhido foi o de Gauss (Equação 5), que possibilita estimar o início e o fim dos estágios de perda de massa.

$$y = y_o + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (5)$$

no qual:

y_o , é ponto final em relação a linha base;

A , é a área do pico em relação a linha base;

w , é 2 “sigma”, aproximadamente 0,849 da largura do pico a meia altura;

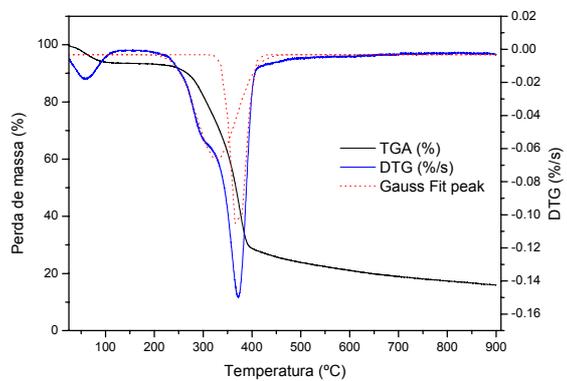
x_c , é o centro do pico;

Este modelo descreve uma curva em forma de sino como a função de distribuição (gaussian) normal da probabilidade. O centro representa o “meio”, quando $w/2$ for o desvio padrão. A Figura 26 apresenta as curvas de TGA, DTG e obtida pelo método de Gauss para cada um dos tipos de serragem usados.

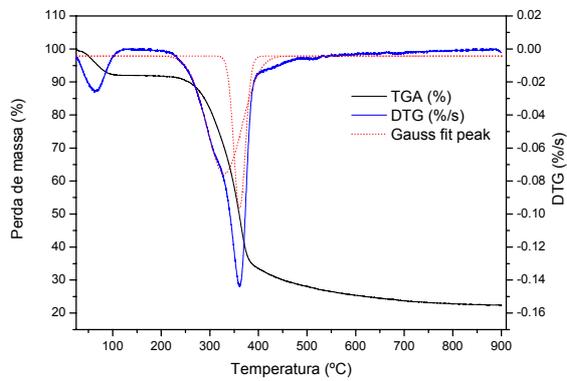
A Tabela 20 apresenta a perda de massa e T_p obtida pela DTG e pelo método de Gauss, para os diferentes tipos de serragem, enquanto a Tabela 21 mostra a massa residual de cada amostra e a temperatura inicial (T_i) de degradação dos estágios de perda de massa. Também apresenta as temperaturas iniciais e finais dos estágios de degradação separados pelo método de Gauss, da segunda perda de massa.

Observando a Tabela 20 verifica-se duas perdas de massa com picos variando entre 46° C e 66,1° C para a primeira perda e entre 362,7° C e 376,1° C para a segunda perda de massa. Atribui-se a primeira perda de massa das serragens analisadas aos materiais voláteis dispersos nas fibras de madeira, os quais incluem a água. LIU et al. (2005) num estudo sobre a pirólise de fibras de rayon derivadas da madeira por termogravimetria e espectrometria de massa, concluíram que a água foi o principal componente entre os gases perdidos na pirólise do material.

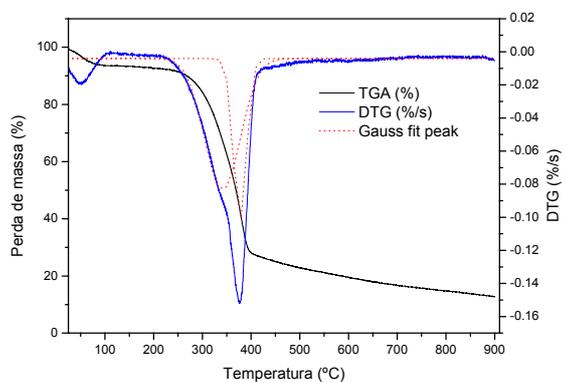
FIGURA 26 - CURVAS DE TGA, DTG E DE GAUSS PARA CADA TIPO DE SERRAGEM DE MADEIRA



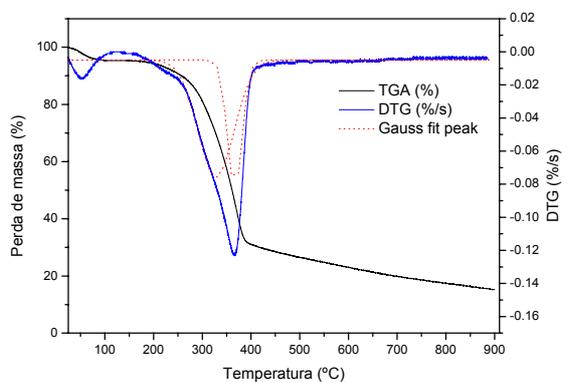
Eucalipto



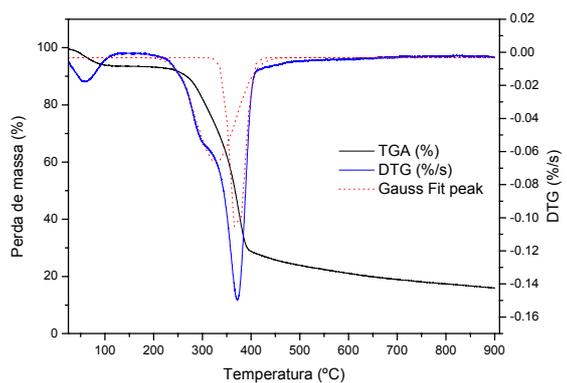
Garapeira



Pinus



MDF



Aglomerado

TABELA 20 - PERDAS DE MASSA E TP PARA OS DIFERENTES TIPOS DE MADEIRA

Amostra	1ª perda de massa (%)	T _{p1} (°C), DTG	2ª perda de massa (%)	T _{p2} ⁺ (°C), DTG	T _{p3} (°C), DTG	++R ²
Eucalipto	5,3	51,4	70,8	322,4	373,7	0,99
Garapeira	7,5	66,1	63,4	329,1	362,7	0,96
MDF	4,3	46,0	64,4	327	364,7	0,99
Pinus	5,8	51,5	65,6	341,3	376,1	0,99
Aglomerado	5,6	57,3	65,6	327	367,6	0,99

NOTAS: ⁺Análise baseada nos dados obtidos através do método de Gauss.

⁺⁺Coefficiente de correlação obtido para o método de Gauss.

TABELA 21 - MASSA RESIDUAL E TEMPERATURA INICIAL (Ti) DOS MAIORES ESTÁGIOS DE PERDA DE MASSA

Amostra	Massa residual [*] (%)	T _i [#] (°C)	T _{i2} ⁺ (°C); T _{f2} ⁺ (°C)	T _{i3} ⁺ (°C); T _{f3} ⁺ (°C)
Eucalipto	11,1	210,3	211,1; 433,7	313,7; 433,7
Garapeira	22,3	197,8	211,1; 442,7	313,7; 407,1
MDF	15,4	156,9	193,4; 449,4	307,1; 427,1
Pinus	13,7	207,2	211,1; 460,4	315,8; 438,1
Aglomerado	16,6	183,5	193,4; 460,4	309,1; 438,1

NOTAS: ^{*}Avaliada a 900°C

[#]Avaliadas através da DTG a 10°C/min

⁺Análise baseada nos dados obtidos através do método de Gauss.

A segunda perda de massa, da qual foram separados dois estágios de degradação com as temperaturas iniciais e finais apresentadas na Tabela 21, corresponde a degradação térmica da madeira. Analisando as temperaturas obtidas em cada estágio e com base nos trabalhos de BARTKOWIAK & ZAKRZEWSKI (2004) e KIM et al. (2004), pode-se concluir que o primeiro estágio observado (T_{i2} - T_{p2}) corresponde à degradação da celulose e da hemicelulose, enquanto o segundo estágio de degradação (T_{i3} - T_{p3}) corresponde ao estágio de degradação da lignina.

É importante também salientar que a temperatura de máxima degradação nesses estágios, que é a mesma para os três componentes da madeira, foi diferente entre os tipos de serragens utilizados. Verificou-se que essas temperaturas foram menores para os derivados da madeira, fato atribuído a uma possível degradação prévia que esse material sofre em seu processo de fabricação.

4.2.3 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A Figura 27 mostra os termogramas de DSC para os diferentes tipos de serragens usados, com finalidade de quantificar a energia necessária para a eliminação dos materiais voláteis de cada tipo. Foi possível observar uma correlação entre a primeira perda de massa analisada via TGA e o evento endotérmico no DSC.

Na Tabela 22 é apresentada a entalpia referente ao processo de perda de massa, bem como as temperaturas dos picos para esse evento. A amostra da garapeira apresentou maior energia nessa transição, fato que mostra que a mesma possui maior matéria volátil. Esse fato sugere que o processamento dos compósitos com este material necessitam de maior compactação, para o auxílio da eliminação deste material.

As maiores temperaturas de pico são encontradas no aglomerado e MDF, fato que pode estar correlacionado a presença de materiais orgânicos como colas e outros aditivos usados nesses painéis.

FIGURA 27 - TERMOGRAMAS DE DSC PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGENS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

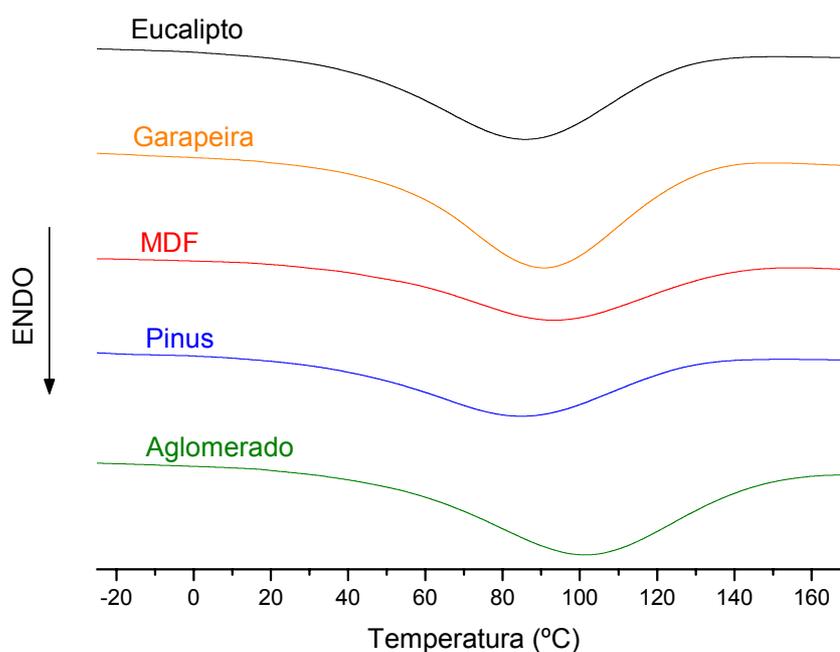


TABELA 22 - VALORES DE ENTALPIA E TEMPERATURA DE PICO

Amostra	ΔH (J/G)	T_p (°C)
Eucalipto	214,1	85,8
Garapeira	229,7	90,8
MDF	147,3	93,2
Pinus	222,1	84,8
Aglomerado	217,9	101,4

4.3 EXPERIMENTOS COM MISTURADOR TERMOCINÉTICO TIPO DRAIS

4.3.1 Modelagem de Misturas de r-HDPE, v-HDPE e Serragem de *Pinus taeda*

A Tabela 23 apresenta os resultados médios das propriedades físico-mecânicas dos compósitos confeccionados com as diferentes misturas de HDPE virgem (v-HDPE), HDPE reciclado (r-HDPE) e serragem de *Pinus taeda*.

TABELA 23 - RESULTADOS MÉDIOS DOS ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS DOS CORPOS DE PROVA CONFECCIONADOS NA MODELAGEM DE MISTURAS (EXPERIMENTO I)

Mistura	v-HDPE (%)	Serragem de pinus (%)	r-HDPE (%)	Tração ¹ (MPa)	Flexão ² (MPa)	Impacto (J/m)	Densidade (g/cm ³)	Dureza (Shore A)
1	100	0	0	24,73	24,87	38,34	0,97	65
2	50	0	50	25,40	24,77	30,92	0,97	65
3	0	0	100	25,66	24,87	33,90	0,96	64
4	33,3	33,3	33,3	21,79	31,11	23,03	1,07	69
5	0	50	50	17,78	33,43	21,82	1,11	73
6	50	50	0	16,70	29,26	20,77	1,12	73
7	12,5	75	12,5	16,76	33,19	15,63	1,21	75

NOTAS: *Cada valor corresponde à média de três repetições

¹ Resistência à tração na força máxima

² Resistência à flexão na força máxima

Na Tabela 24 são apresentadas as equações simplificadas, onde foram descartados os coeficientes não significativos pelo teste “t” de student, para as propriedades físico-mecânicas das placas.

TABELA 24 - EQUAÇÕES SIMPLIFICADAS PARA A DENSIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS CHAPAS, UTILIZANDO-SE APENAS OS COEFICIENTES SIGNIFICATIVOS PELO TESTE "t"

Propriedade	Equação	F	R ²
Densidade (g/cm ³)	Densidade = 0,969*PEV + 0,959*PER + 1,316*SER	116,57 ¹	0,980
Resistência à Tração (Mpa)	Tração = 24,73*PEV + 25,66*PER + 16,36*SER	15,19 ¹	0,867
Resistência à Flexão (Mpa)	Flexão = 24,87*PEV + 24,87*PER + 32,90*SER	7,02 ¹	0,750
Resistência ao Impacto (J/m)	Impacto = 38,34*PEV + 33,90*PER + 12,20*SER - 20,81*PEV*PER	35,05 ¹	0,937
Dureza (Shore A)	Dureza = 65,00*PEV + 64,33*PER + 76,88*SER	12,50 ¹	0,843

NOTAS: ¹ Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

PEV = Proporção de polietileno de alta densidade virgem

PER = Proporção de polietileno de alta densidade reciclado

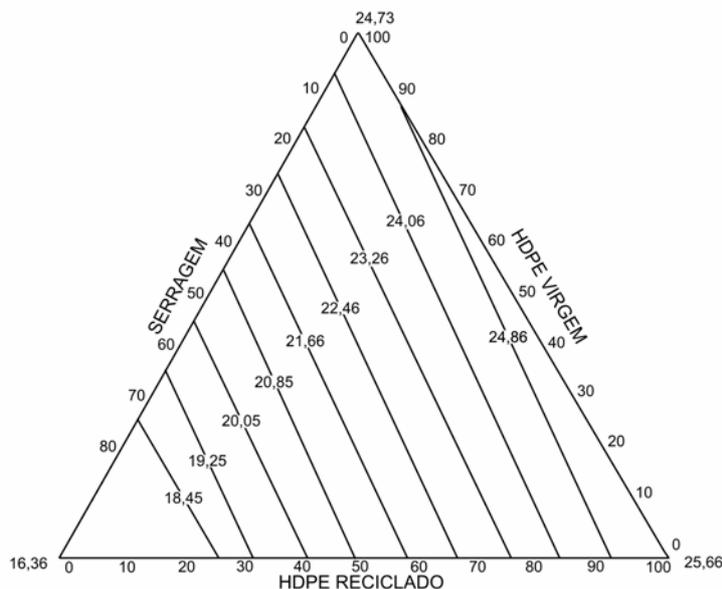
SER = Proporção de serragem

A análise dos resultados permitiu verificar que a resistência à tração diminui com o aumento do teor de serragem. Na equação simplificada, o coeficiente para a proporção de serragem tem valor menor que os coeficientes derivados para o v-HDPE e r-HDPE, indicando uma diminuição desta propriedade em aproximadamente 35% com a adição de serragem. Por outro lado, a semelhança entre os valores dos coeficientes do v-HDPE e do r-HDPE, sendo este último ligeiramente superior, mostram que a reciclagem não prejudica as propriedades mecânicas do HDPE. Estes resultados confirmam as afirmações de HARPER (1996), de que o polietileno quando reciclado mantém suas propriedades mecânicas.

KAMDEM et al. (2004), por outro lado, encontraram valores de MOE e de MOR, de chapas prensadas de compósitos de HDPE virgem e serragem de pinus, maiores do que os valores observados para chapas de HDPE reciclado. No entanto, os autores comentam que o HDPE reciclado usado no experimento continha mistura de polímeros, o que causou alguns problemas de miscibilidade.

A Figura 28 apresenta o gráfico ternário da resistência à tração em função da mistura dos três componentes. Pode ser observado que o polietileno reciclado possui boas propriedades, pois as linhas de resistência à tração não são paralelas ao vértice do v-HDPE e mostram uma pequena diminuição dessa propriedade à medida em que aumenta a proporção de v-HDPE em relação ao r-HDPE.

FIGURA 28 - GRÁFICO TERNÁRIO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa) DOS COMPOSTOS EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECICLADO) E SERRAGEM DE PINUS



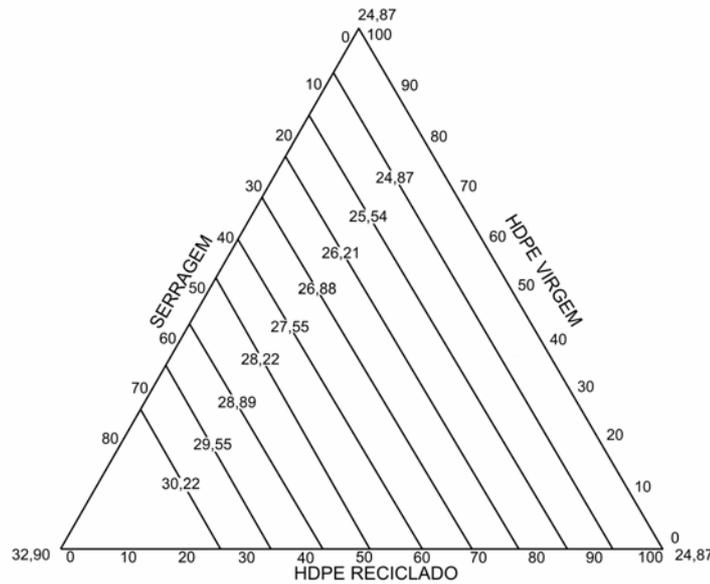
Para a resistência à flexão, os coeficientes também foram semelhantes para o v-HDPE e o r-HDPE. A adição de serragem provocou aumento na resistência à flexão, fato também constatado por diversos autores (YOUNGQUIST, 1999; ROBIN & BRETON, 2001; COLOM et al., 2003). Também, esse fato é confirmado pelo valor do coeficiente encontrado para serragem, igual a 32,90.

COLOM et al. (2003) encontraram um aumento do MOE de 110% a 120% quando foi incorporado 40% de fibras lignocelulósicas nos compósitos, tanto naqueles em que foi usado um agente de acoplamento como naqueles sem agente. O MOE dos compósitos depende da dispersão das fibras na matriz de HDPE, sendo as fibras responsáveis pelo decréscimo da capacidade de deformação na zona elástica. Enquanto o HDPE é dúctil, as fibras são rígidas, de forma que a elongação até o ponto de ruptura teoricamente deve depender do conteúdo de fibras utilizado. Esse fato, no entanto, deve ser mais pronunciado quando a dispersão das fibras na matriz ocorre adequadamente. Isso foi confirmado pelos autores, pois a elongação até o ponto de ruptura foi levemente maior nos compósitos em que foi usado agente de acoplamento.

Não houve nenhum tipo de interação, binária ou ternária, entre as misturas estudadas, permitindo concluir que a resistência à flexão, da mesma que a forma

que a resistência à tração, é afetada apenas pelas características individuais de cada componente da mistura. A Figura 29 apresenta o gráfico ternário de resistência à flexão em função da mistura dos três componentes. Nesse caso, verifica-se, pelas linhas paralelas ao vértice do HDPE virgem, que não houve diferenças entre esse e o HDPE reciclado.

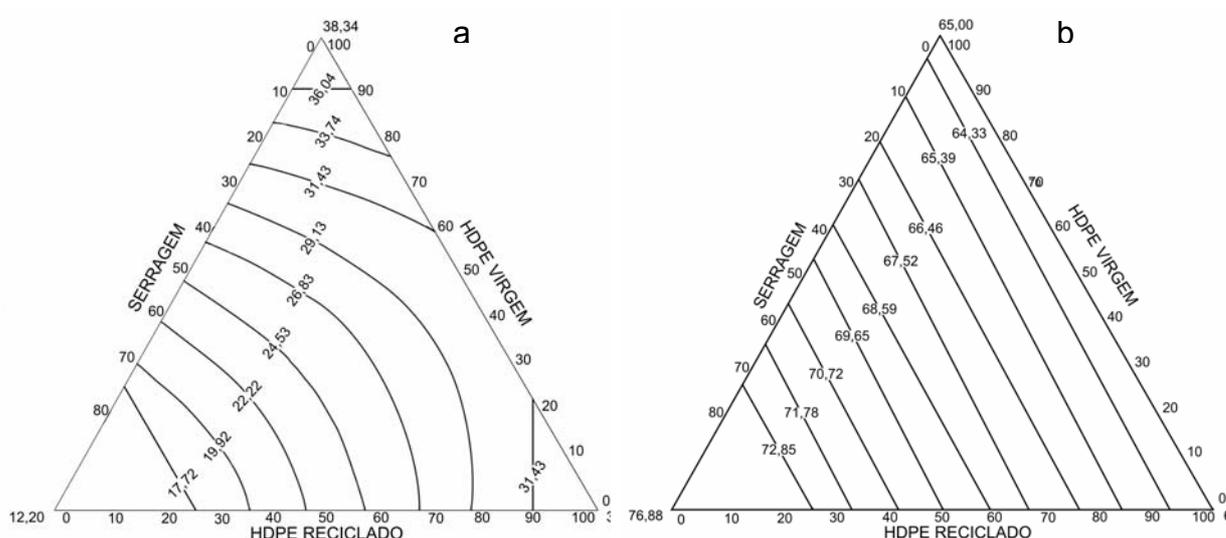
FIGURA 29 - GRÁFICO TERNÁRIO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa) DOS COMPOSTOS EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECIKLADO) E SERRAGEM DE PINUS



A adição de serragem causou diminuição dos valores de resistência ao impacto e aumento dos valores de dureza, sendo o efeito mais pronunciado para a resistência ao impacto. Nesse caso, o coeficiente linear calculado para o polietileno reciclado foi um pouco inferior ao calculado para polietileno virgem, confirmando as considerações de HARPER (1996) quando comenta que a resistência ao impacto do polietileno reciclado pode sofrer diminuição quando submetido à reciclagem. Verificou-se, ainda, que o polietileno virgem e o polietileno reciclado interagiram antagonisticamente, pois o coeficiente calculado para a interação é negativo. Este fato pode ser atribuído à diferença de polaridade entre a resina virgem e a reciclada, ocasionada pela degradação e conseqüente aumento da polaridade da resina reciclada.

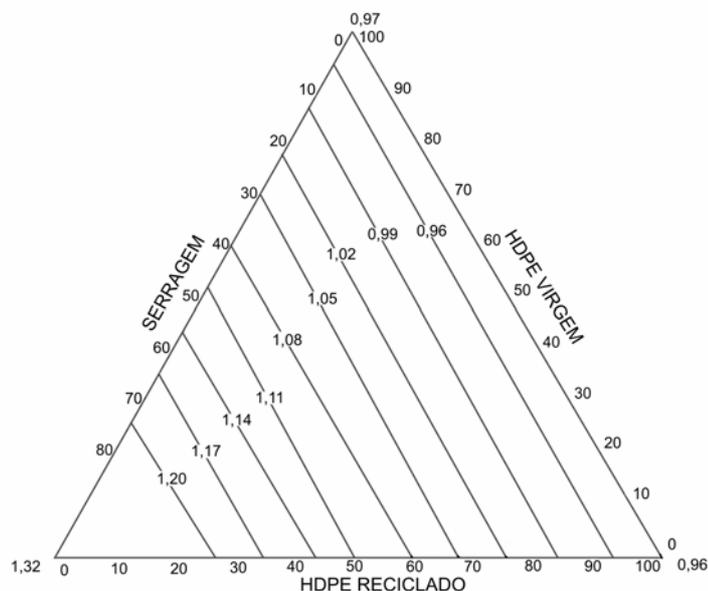
A Figura 30 apresenta os gráficos ternários de resistência ao impacto e de dureza, em função da mistura dos três componentes. Pode-se observar que, devido à interação entre v-HDPE e r-HDPE, o gráfico de impacto apresenta as linhas curvas, com tendência de diminuição dos valores na medida que aumentam as proporções da mistura dos polietilenos.

FIGURA 30 - RESISTÊNCIA AO IMPACTO (J/m) (A) E DUREZA SHORE A (B) EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECICLADO) E SERRAGEM DE PINUS



Por fim, o aumento da proporção de serragem causou aumento da densidade do compósito. Este fato já foi verificado por HILLIG *et al.* (2002), devido à compactação da serragem no momento da prensagem. Tendo em vista que a densidade da madeira utilizada no presente estudo é de aproximadamente $0,5 \text{ g/cm}^3$, o coeficiente linear da serragem calculado para a densidade, igual a 1,316, mostra que ocorreu compactação da serragem de madeira, provocada pela força aplicada. A Figura 31 apresenta o gráfico ternário da densidade dos compósitos em função da mistura dos três componentes.

FIGURA 31 - GRÁFICO TERNÁRIO DA DENSIDADE (g/cm^3) DOS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DA MISTURA DE v-HDPE (VIRGEM), r-HDPE (RECICLADO) E SERRAGEM DE PINUS



4.3.2 Uso de Agentes de Acoplamento nos Compósitos (Experimento II)

Os valores médios de resistência à tração e à flexão na força máxima, encontrados para os corpos-de-prova dos compósitos confeccionados com agente de acoplamento comercial (polybond), agente de acoplamento produzido em laboratório (HDPE maleinizado) e sem agente de acoplamento, com diferentes proporções de serragem e HDPE reciclado, são mostrados na Tabela 25.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, visando determinar se houve diferenças significativas pelo teste de F entre as variáveis analisadas. Na Tabela 26 e na Tabela 27 são apresentadas as análises de variância realizadas, onde verifica-se que para resistência à tração as duas variáveis analisadas e a interação entre elas apresentaram diferença estatística significativa, enquanto que para resistência à flexão somente a proporção de serragem não apresentou diferença significativa.

TABELA 25- VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À FLEXÃO DAS PLACAS COM AS DIFERENTES MISTURAS DE SERRAGEM DE PINUS, r-HDPE E AGENTES DE ACOPLAMENTO

Mistura	Tipo de Agente	Serragem (%)	Tração ¹ (MPa)	Flexão ² (MPa)
1	sem uso de agente	20	17,8	25,1
2		40	14,3	22,8
3		60	11,1	17,4
4	g-HDPE	20	20,6	28,3
5		40	17,4	25,0
6		60	16,0	26,6
7	polybond	20	24,8	31,4
8		40	21,9	30,4
9		60	25,0	36,0

NOTAS: *Cada valor corresponde à média de duas repetições

¹ Resistência à tração na força máxima

² Resistência à flexão na força máxima

TABELA 26 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS PLACAS COM DIFERENTES TIPOS DE AGENTE DE ACOPLAMENTO E PROPORÇÕES DE SERRAGEM

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F
Agente de acoplamento	276,370	2	138,185	77,965*
Proporção de Serragem	48,780	2	24,390	13,761*
Agente x Serragem	31,419	4	7,855	4,432*
Erro	15,952	9	1,772	
Total	372,521	17		

NOTA: *Significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro

TABELA 27 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS PLACAS COM DIFERENTES TIPOS DE AGENTE DE ACOPLAMENTO E PROPORÇÕES DE SERRAGEM

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F
Agente de acoplamento	353,350	2	176,675	67,193*
Proporção de Serragem	15,379	2	7,690	2,925
Agente x Serragem	93,837	4	23,459	8,922*
Erro	23,664	9	2,629	
Total	486,231	17		

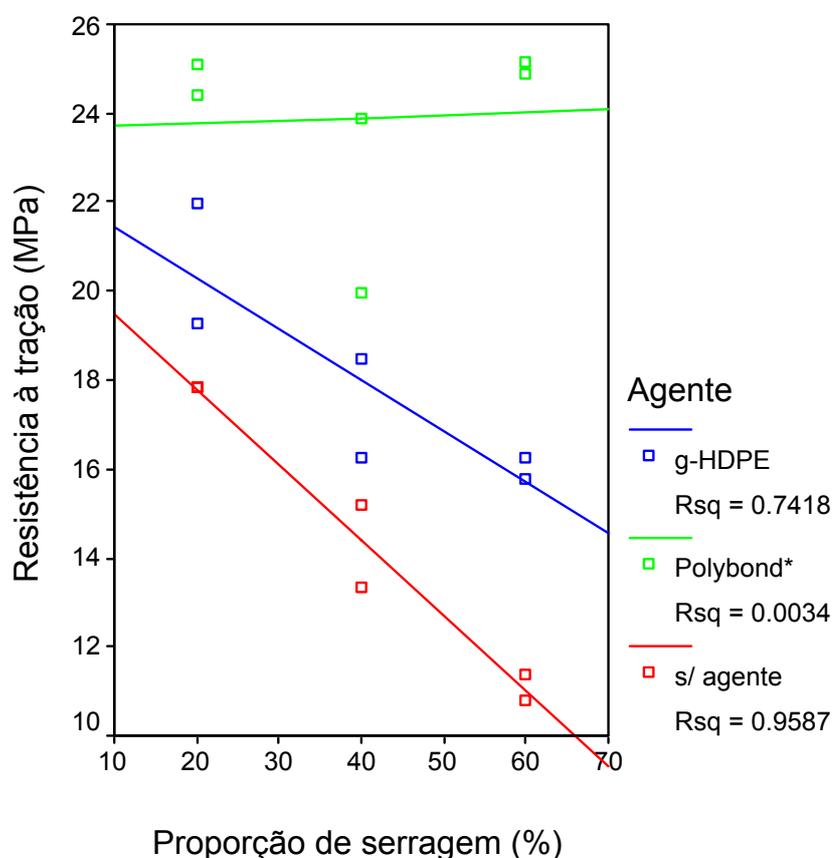
NOTA: *Significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro

O fato da variação da proporção de serragem não ter influenciado nos valores médios de resistência à flexão das placas confeccionadas, mostra que pode

não ter havido uma boa dispersão do resíduo de madeira na matriz polimérica. Segundo a literatura, um aumento da proporção de serragem nos compósitos deve provocar aumento da resistência à flexão quando a dispersão do reforço na matriz polimérica for bem realizada (COLOM et al., 2003). No entanto, a análise de variância também mostrou que houve interação entre a proporção de serragem e o tipo de agente de acoplamento. Assim, se pode inferir que esse efeito pode ter ocorrido para apenas para algum dos tipos de agentes de acoplamento usados.

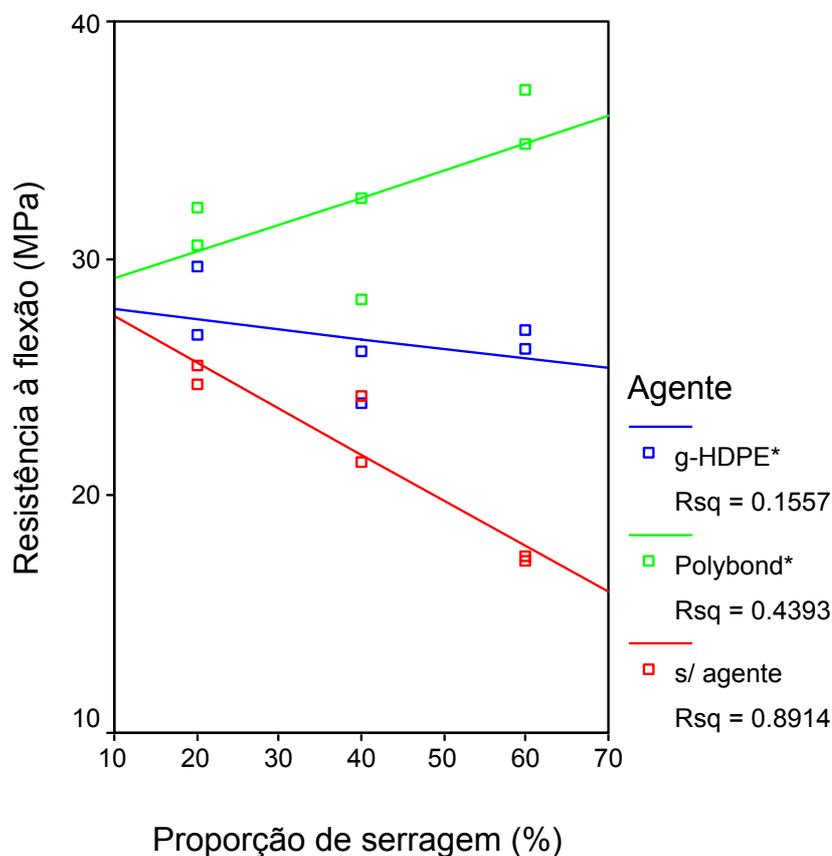
Visando elucidar melhor essa questão, foram analisados os gráficos das Figuras 32 e 33, que ilustram as diferentes variações ocorridas nas propriedades mecânicas das chapas em função da variação na proporção de serragem e para cada tipo de agente de acoplamento utilizado.

FIGURA 32 - VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA UM DOS AGENTES DE ACOPLAMENTO UTILIZADOS



NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade de erro.

FIGURA 33 – VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA UM DOS AGENTES DE ACOPLAMENTO UTILIZADOS



NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade de erro.

O uso do g-HDPE diminuiu a perda de resistência que ocorreu com o aumento da proporção de serragem em ambas as propriedades (tração e flexão) em relação aos compósitos sem agente. Na resistência à tração, o agente de acoplamento comercial (Polybond) evitou essa diminuição e na resistência à flexão possibilitou, inclusive, um aumento dos valores médios dessa propriedade com o aumento da proporção de serragem.

Numa análise geral dos resultados, verificou-se que o uso do agente de acoplamento Polybond 3009 ocasionou valores médios mais altos de resistência à tração e à flexão que os obtidos com as placas confeccionadas com g-HDPE ou sem o uso de agente de acoplamento, em qualquer das proporções de serragem usadas. O g-HDPE, confeccionado no laboratório, mostrou resultados inferiores ao comercial, mas superiores aos encontrados para as chapas onde não se utilizou agente de

acoplamento. É possível também visualizar nas Figuras 32 e 33 que esse efeito foi mais pronunciado para a proporção de 60% de serragem.

Em geral, os autores são unânimes em afirmar que o uso de poliolefinas modificadas com anidrido maleico promovem uma melhor dispersão das fibras celulósicas na matriz polimérica. RAJ et al. (1989) confeccionaram compósitos com melhor resistência à tração usando fibras tratadas com HDPE e LDPE modificados com anidrido maleico, do que com fibras não tratadas. LAI et al. (2003) demonstraram que o uso de anidrido maleico em diferentes poliolefinas foi mais eficaz quando usado para funcionalizar HDPE e LLDPE.

SELKE & CHILDRESS (1993) usando MAPP em compósitos com 40% de fibras de Aspen em HDPE, nas proporções de 1, 3 e 5%, obtiveram os melhores resultados de resistência à tração e de MOE com a proporção de 5% de agente de acoplamento. Com base nesses trabalhos e nos resultados obtidos, pode-se também inferir que o fato do g-HDPE não apresentar a mesma eficiência do Polybond se deve a uma funcionalização não completa do HDPE pelo anidrido maleico nas condições utilizadas.

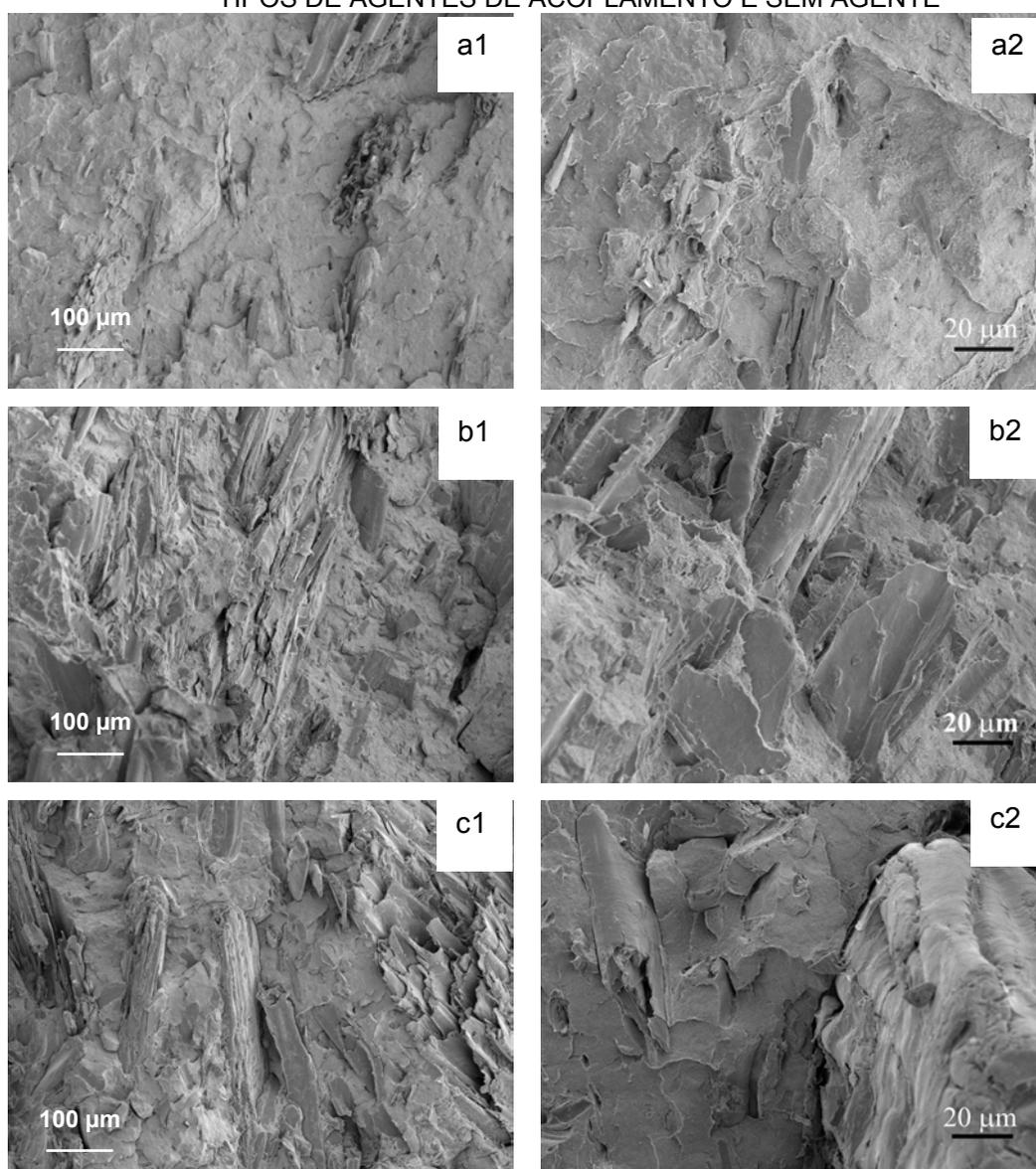
Na Figura 34 são apresentadas as micrografias da microscopia eletrônica de varredura (SEM) da fratura de amostras dos compósitos confeccionados com os dois diferentes tipos de agente de acoplamento e sem agente, para a proporção de 40% de serragem nos compósitos. Nessas micrografias, pode-se confirmar que a dispersão da serragem no compósito foi melhor com o uso do agente de acoplamento comercial.

Nas micrografias do compósito com agente de acoplamento comercial, não há diferenças marcantes entre as fases de fibra e de matriz, mostrando um composto homogêneo. Já na micrografia do compósito com HDPE maleinizado aparecem essas duas fases, com marcante definição da disposição das fibras. Na micrografia do compósito sem agente de acoplamento, além de estarem bem definidas essas duas fases, aparecem agregados de fibras e regiões de espaços vazios entre as fibras e a matriz, mostrando a fraca adesão entre ambas.

BENGTSSON et al. (2005), usando silano como agente de acoplamento, também compararam micrografias da face da fratura de compósitos de HDPE e serragem de pinus, de compósitos com e sem agente de acoplamento. Da mesma

forma, os autores verificaram melhor dispersão da serragem na matriz com o uso do agente a base de silano. Foi possível visualizar regiões onde as fibras foram destacadas do HDPE na fratura (compósitos sem agente), que foram confrontadas com regiões onde houve o rompimento longitudinal da fibra (compósitos com agente). Isso é uma indicação de que há transferência dos esforços sofridos pela matriz, mais fraca, para a fibra, mais forte.

FIGURA 34- MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS COMPÓSITOS, CONFECCIONADOS COM OS DOIS DIFERENTES TIPOS DE AGENTES DE ACOPLAMENTO E SEM AGENTE



NOTAS: (a1 e a2) 40% de serragem e Polybond 3009 (b1 e b2) 40% de serragem e HDPE maleinizado; (c1 e c2) 40% de serragem e sem agente

4.3.3 Propriedades de Compósitos Confeccionados com r-HDPE e Diferentes Tipos de Serragem de Madeira e Derivado, com Misturador Tipo Drais

Na Tabela 28, são apresentados os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas dos compósitos, juntamente com os desvio-padrão entre os corpos-de-prova de cada placa. Os resultados permitiram verificar que todas as misturas apresentaram valores médios compatíveis com os valores observados na literatura, para misturas de HDPE e serragem de madeira (SONG, 2001; ROBIN & BRETON, 2001; LAI et al, 2002; COLOM et al, 2003; BENGTSSON et al, 2005; KIM et al, 2005).

Os valores de resistência à tração variaram de 12,66 a 22,37 MPa e os valores de resistência à flexão de 20,49 a 41,31 MPa. Para os valores de resistência ao impacto, a amplitude variou de 18,47 a 26,52 J/m, e para os valores de dureza Shore A de 60,70 a 74,20. Nota-se, assim, pela amplitude de valores médios, uma maior influência das variáveis analisadas quando relacionadas às propriedades de resistência à tração e à flexão, pois a amplitude de variação dos valores médios foi maior nessas propriedades.

É possível verificar também que existe uma variação relativamente alta entre os valores de cada uma das propriedades mecânicas determinadas para as duas placas confeccionadas com a mesma mistura (repetição). Essa variação é devida ao tipo de processo, onde as misturas foram realizadas em misturador termocinético, para após serem prensadas. O processo de mistura em misturador termocinético tipo Drais, embora proporcione uma boa homogenização dos compósitos, é realizado em três etapas pois a câmara de mistura comporta um terço da massa de material necessário para prensagem de uma placa.

CONTINUA

TABELA 28 - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PLACAS CONFECCIONADAS COM DIFERENTES TIPOS E PROPORÇÕES DE SERRAGEM EM MISTURADOR TERMOCINÉTICO TIPO DRAIS

Placa	Serragem	Proporção de Serragem (%)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Alongamento à Flexão (%)	Módulo de Elasticidade MOE (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)	Dureza Shore A
1	Pinus	20	0,935 (0,032)	18,91 (1,45)	33,64 (1,44)	5,33 (0,52)	1671 (430,7)	25,08 (1,93)	67,6 ---
2	Pinus	20	1,017 (0,061)	21,56 (0,43)	37,47 (1,51)	5,28 (0,77)	1769 (438,2)	20,70 (8,98)	61,0 ---
3	Pinus	40	1,022 (0,038)	15,67 (1,39)	29,10 (0,81)	2,56 (0,19)	2354 (75,0)	22,75 (2,67)	69,3 ---
4	Pinus	40	0,996 (0,060)	17,46 (1,35)	28,05 (4,16)	2,85 (1,10)	1880 (77,9)	22,33 (1,75)	70,4 ---
5	Pinus	60	1,147 (0,007)	17,23 (0,33)	30,23 (3,37)	1,76 (0,14)	2791 (180,6)	25,03 (2,01)	71,7 ---
6	Pinus	60	1,170 (0,019)	18,33 (1,45)	32,75 (4,36)	1,73 (0,20)	3209 (375,0)	26,52 (2,57)	72,8 ---
7	Garapeira	20	1,061 (0,016)	19,84 (1,03)	41,31 (2,05)	3,55 (0,43)	2843 (257,5)	24,87 (1,90)	72,0 ---
8	Garapeira	20	1,015 (0,019)	20,82 (1,42)	36,68 (5,72)	2,85 (0,56)	2741 (41,6)	21,92 (1,92)	72,5 ---
9	Garapeira	40	1,043 (0,022)	22,37 (1,99)	35,85 (3,94)	4,83 (0,63)	2264 (205,5)	21,18 (4,56)	69,3 ---
10	Garapeira	40	0,951 (0,018)	19,14 (1,03)	36,56 (1,12)	3,78 (0,10)	2101 (177,1)	23,92 (0,84)	71,8 ---

NOTA: Valores entre parênteses referem-se ao desvio-padrão entre corpos-de-prova da mesma placa

CONCLUSÃO

TABELA 28 - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PLACAS CONFECCIONADAS COM DIFERENTES TIPOS E PROPORÇÕES DE SERRAGEM EM MISTURADOR TERMOCINÉTICO TIPO DRAIS

Placa	Serragem	Proporção de Serragem (%)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Alongamento à Flexão (%)	Módulo de Elasticidade MOE (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)	Dureza Shore A
11	Garapeira	60	1,157 (0,061)	22,04 (2,04)	35,12 (1,71)	2,42 (0,25)	2995 (186,5)	26,04 (1,25)	74,2 ---
12	Garapeira	60	1,192 (0,022)	22,15 (0,67)	37,64 (11,39)	3,49 (0,49)	2429 (784,7)	23,80 (2,76)	72,6 ---
13	MDF	20	0,833 (0,005)	12,66 (1,08)	22,89 (4,69)	3,71 (0,59)	1515 (123,9)	21,88 (2,64)	66,4 ---
14	MDF	20	0,807 (0,069)	18,37 (0,42)	27,20 (0,40)	5,54 (0,42)	1364 (283,60)	26,16 (2,60)	60,7 ---
15	MDF	40	1,013 (0,038)	18,80 (2,76)	33,16 (3,13)	3,03 (0,81)	2507 (124,9)	21,33 (2,86)	69,3 ---
16	MDF	40	1,075 (0,051)	17,99 (3,17)	33,90 (6,03)	3,70 (0,89)	2346 (249,9)	25,32 (7,34)	61,5 ---
17	MDF	60	1,149 (0,010)	21,93 (3,31)	37,76 (1,78)	2,19 (0,09)	2586 (752,0)	24,34 (2,81)	74,1 ---
18	MDF	60	1,176 (0,029)	19,34 (2,67)	36,35 (0,42)	2,20 (0,31)	3208 (49,7)	26,06 (1,93)	73,9 ---

NOTA: Valores entre parênteses referem-se ao desvio-padrão entre corpos-de-prova da mesma placa

Na Tabela 29 é apresentada a correlação de Pearson entre as propriedades físico-mecânicas das placas confeccionadas com diferentes tipos de serragem em misturador tipo Drais.

A densidade das placas mostrou correlação significativa com todas as outras propriedades analisadas, exceto com a resistência ao impacto. Embora alguns trabalhos façam referência à densidade como uma variável importante para caracterização do material, a maioria dos autores a negligencia. HWANG et al. (1999) comentam que uma das razões para efeitos adversos observados em painéis confeccionados com polietileno reciclado e madeira é devida à variação de densidade nos painéis. Esse trabalho, também mostra que a densidade de compósitos de HDPE e madeira, prensados, se correlacionam com as suas propriedades mecânicas.

Também pode-se verificar analisando a Tabela 29 que a proporção de serragem não apresentou correlação significativa, ao nível de 5% de probabilidade de erro, com a resistência à tração e à flexão. Nesse caso, uma fração dos efeitos é devida à variação de densidade que ocorre entre os diferentes tipos de serragem. Outra fração tem explicação nas variações ocorridas naquelas propriedades, entre placas confeccionadas com a mesma mistura e numa mesma placa.

Para confirmar essa afirmação, foram calculados os coeficientes de variação (CVs) do experimento para as variáveis: densidade, resistência à tração e resistência à flexão. Na Tabela 30 é apresentado o resumo da análise de variância para essas três variáveis, com os respectivos CVs de cada uma delas. É possível confirmar que o CV calculado para a densidade é menor que o CV calculado para a resistência à tração e à flexão.

TABELA 29 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DAS PLACAS CONFECCIONADAS COM DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM EM MISTURADOR TIPO DRAIS

	Proporção serragem	Densidade	Resistência à tração	Resistência à flexão	Alongamento à flexão	MOE	Resistência ao Impacto	Dureza
Proporção de serragem	1							
Densidade	0,737*	1						
Resistência à tração	0,246	0,494*	1					
Resistência à flexão	0,162	0,558*	0,821*	1				
Alongamento à flexão	-0,720*	-0,664*	0,119	-0,013	1			
MOE	0,665*	0,850*	0,324	0,502*	-0,782*	1		
Resistência ao impacto	0,407	0,311	0,013	0,068	-0,263	0,375	1	
Dureza	0,615*	0,624*	0,268	0,361	-0,731*	0,729*	0,198	1

NOTA: * Correlação significativa a 5% de probabilidade de erro pelo teste t

TABELA 30 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA DENSIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO EXPERIMENTO COM DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM EM MISTURADOR TIPO DRAIS

Fonte de Variação	GL	Quadrado médio		
		Densidade	Resistência à tração	Resistência à flexão
Mistura	8	0,026	9,592	40,564
Resíduo	9	0,001	5,049	17,748
Coeficiente de Variação (%)		3,03	9,76	5,92

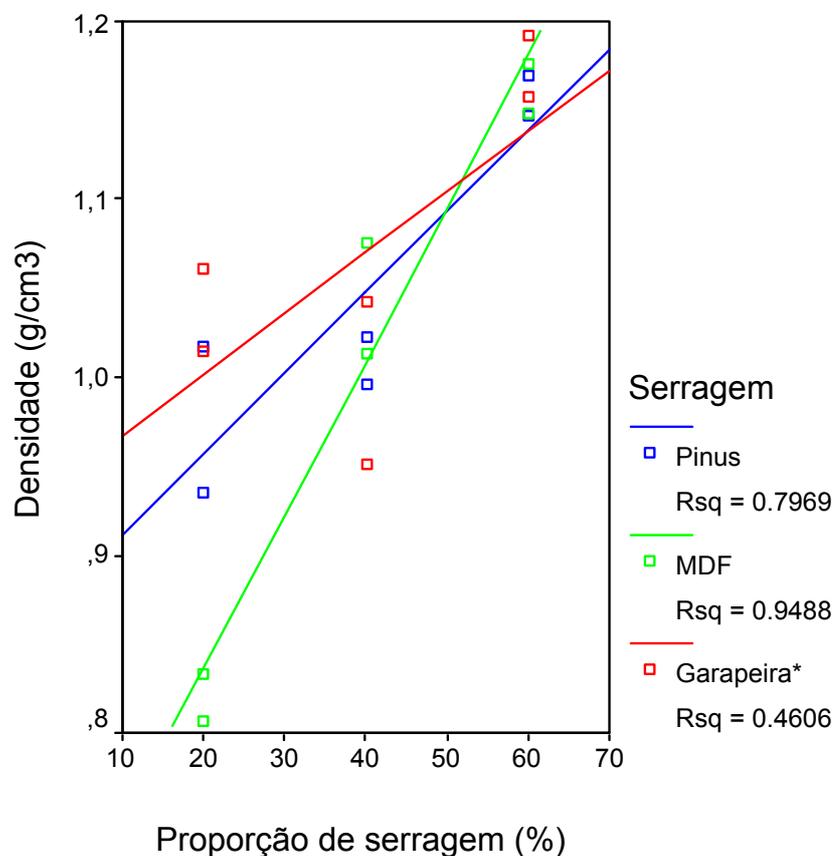
4.3.3.1 Densidade das placas

Na Figura 35 é apresentado o gráfico dos valores médios de densidade de cada placa em função da proporção de serragem, para cada tipo de serragem utilizada. Verifica-se que, além da influência da proporção de serragem, existe uma interação entre o tipo de serragem e a proporção de serragem.

Pela correlação positiva entre a proporção de serragem e a densidade das placas (Tabela 29), verifica-se que um aumento da proporção de serragem nas placas causa um aumento da sua densidade. Esse efeito já foi discutido em HILLIG et al. (2002) e é devido à compactação das partículas de madeira durante a prensagem. Aqui, observa-se esse efeito independente do tipo de madeira usado, embora a sua influência não possa ser descartada.

Também é possível visualizar (Figura 35) que a afirmação de que a proporção de serragem é dependente da densidade da placa não foi válida para serragem de Garapeira, tendo em vista o baixo coeficiente de determinação (R^2) encontrado para a linha de regressão e sua não significância pelo teste de F, quando se considera essa espécie individualmente. Além disso, um aumento da proporção de serragem de 20% para 60% causa um aumento maior da densidade das placas de serragem MDF do que das placas com serragem de pinus ou de garapeira, embora a linha de regressão para essa última não seja estatisticamente significativa.

FIGURA 35 - DENSIDADE DAS PLACAS CONFECCIONADAS EM DRAIS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM, PARA CADA TIPO DE SERRAGEM



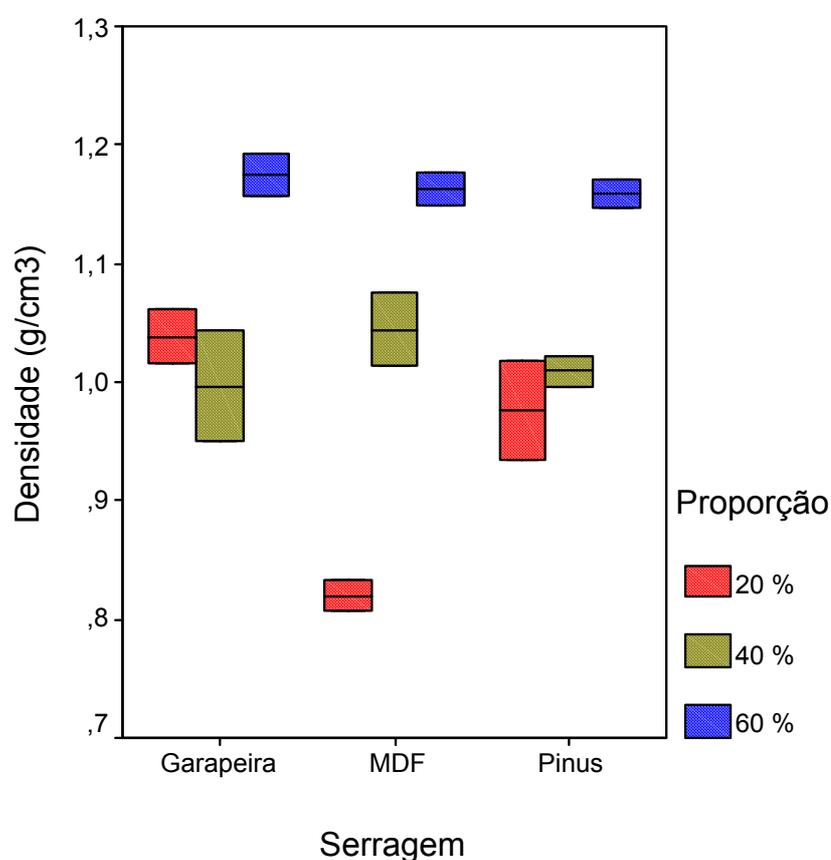
NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Na Figura 36 é apresentado o gráfico dos valores médios e a amplitude dos valores observados de densidade das placas, para cada tipo de serragem e proporção de serragem. Verifica-se que os valores médios de densidade das placas confeccionadas com garapeira na proporção de 40% foram inferiores aos de 20% de serragem, não seguindo a mesma tendência dos outros tipos de serragem. Atribuiu-se esse fato à provável maior porosidade dessas placas devido à formação de um maior número de bolhas no momento da prensagem.

Verificou-se porosidade em todas as placas prensadas, ocasionadas provavelmente por bolhas de ar decorrentes da evaporação de umidade residual da serragem. Essa umidade depende da umidade de equilíbrio da madeira, que difere principalmente do MDF para as duas espécies de madeira usadas. Como o material foi seco em estufa a 65°C de temperatura, a serragem de pinus e a de garapeira

mantiveram uma umidade residual estimada em 3,5%, enquanto a serragem de MDF não manteve umidade. Além disso, como a madeira de garapeira apresenta uma densidade básica maior que a madeira de pinus, haveria uma maior quantidade de água aderida à serragem daquela espécie, proporcionando a formação de maior número de bolhas.

FIGURA 36 - VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE DAS PLACAS CONFECCIONADAS EM DRAIS E AMPLITUDE DE VALORES PARA CADA TIPO E PROPORÇÃO DE SERRAGEM



Outra evidência da porosidade das placas prensadas é, por exemplo, o fato da densidade média das placas com 60% de serragem ser inferior a $1,2 \text{ g/cm}^3$. Se for considerada a regra das misturas, tem-se que a densidade da placa deve ser a soma das densidades de ambos os componentes, proporcionalmente. Considerando que a densidade da parede celular de qualquer madeira é de

aproximadamente $1,53 \text{ g/cm}^3$, poderiam ser obtidas placas com densidade de até $1,30 \text{ g/cm}^3$ para a proporção de 60% de serragem.

Por fim, para explicar o fato da densidade média das placas confeccionadas com 60% de serragem apresentarem valores médios mais altos em relação às outras proporções usadas para qualquer tipo de serragem, deve-se considerar que para essa proporção em massa de madeira, a proporção em volume é relativamente alta em relação ao polietileno. Assim, embora exista uma maior quantidade de água em forma de umidade residual da serragem, existe também maior porosidade na mistura, proporcionada pela serragem e que permite o escape dos gases gerados.

4.3.3.2 Resistência à tração

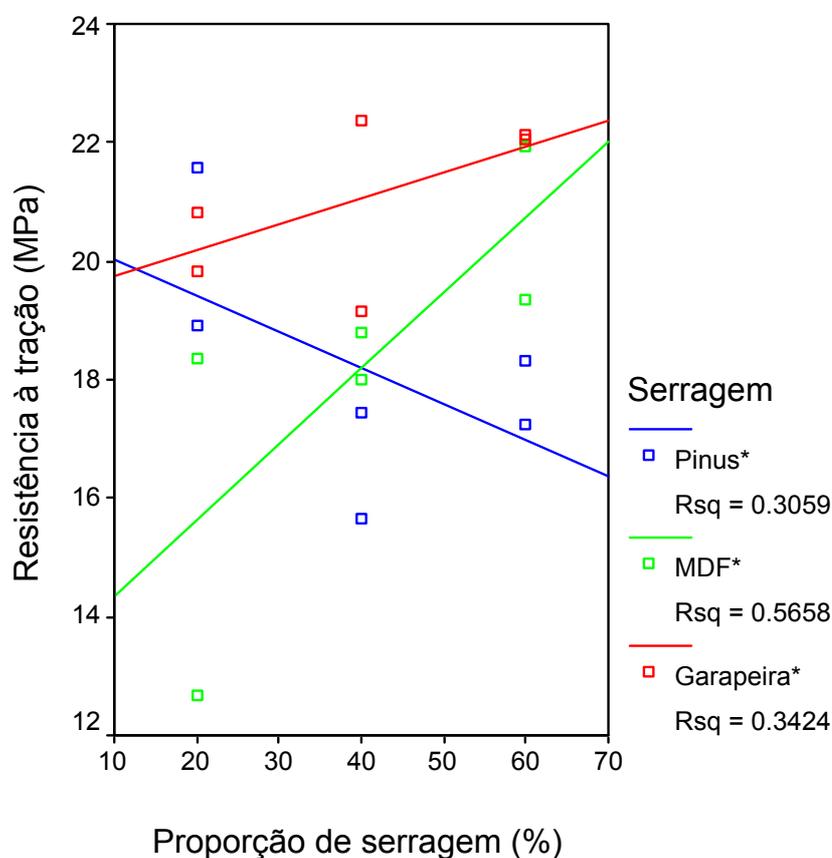
Os valores encontrados para resistência à tração são semelhantes aos verificados por BENGTTSSON et al (2005) e por COLOM et al (2003). Nesses trabalhos foi verificada uma influência da proporção de serragem na resistência à tração, em especial quando é usado um agente de acoplamento adequado. BENGTTSSON et al (2005) verificaram um aumento na resistência à tração de compósitos confeccionados com 40% de serragem e 60% de HDPE graftizado com *vinyltrimethoxy silane* (XLPE) em relação ao XLPE puro. Por outro lado, compósitos confeccionados com 40% de serragem e 60% de HDPE apresentaram valores de resistência à tração menores que o HDPE puro.

ROBIN & BRETON (2001) também encontraram uma correlação entre o módulo de elasticidade à tração (E) e proporção de serragem, para compósitos de HDPE reciclado e serragem de *spruce*. Os autores verificaram um aumento do E de 911 MPa para HDPE puro até 1.600 MPa para compósitos com 30% de serragem. Por outro lado, também não encontraram essa mesma correlação para a resistência à tração, a qual se verificou com máximo valor a 10% de conteúdo de serragem. Acima desse percentual, a resistência à tração diminuiu com o aumento da proporção de serragem.

Nesse experimento, os valores de resistência à tração variaram de 12,66 MPa à 22,37 MPa, mostrando uma amplitude de variação dos valores relativamente alta. Também não foi possível estabelecer a influência da proporção de serragem na

resistência à tração, mesmo analisando cada tipo de serragem individualmente. O fato já discutido de ter ocorrido a formação de bolhas nas placas confeccionadas com os diferentes tipos de serragem, teve efeitos nas propriedades mecânicas das placas, sendo esse efeito sentido com muita intensidade na resistência à tração. A Figura 37 apresenta o gráfico de resistência à tração em função da proporção de serragem para cada tipo de serragem usada.

FIGURA 37 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS



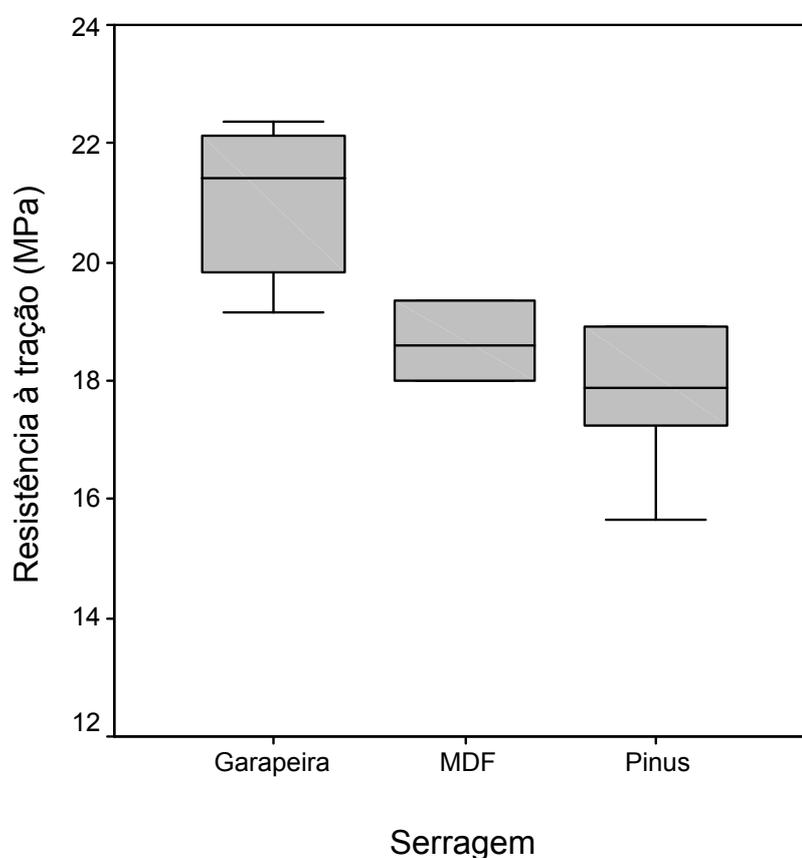
NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

Pode-se verificar que uma das causas de não se encontrar uma correlação significativa entre a proporção de serragem e a resistência à tração se deve ao fato de que os valores dessa propriedade variaram de forma diferente de um tipo de serragem para outro em relação à variação da proporção de serragem. Embora a regressão linear da resistência à tração em função da proporção de serragem não

seja significativa para todos os tipos de serragem, nota-se a tendência contrária da serragem de pinus em relação às serragens de MDF e de garapeira. Considerando que nesse trabalho foi utilizado o agente de acoplamento comercial de HDPE graftizado com anidrido maleico, verifica-se que a porosidade provocada pela formação de bolhas, nas placas confeccionadas com pinus, teve efeito negativo nos valores de resistência à tração com o aumento do teor de serragem.

Por outro lado, notou-se também a tendência das placas confeccionadas com garapeira apresentaram valores médios de resistência à tração maiores que os valores observados para os outros dois tipos de serragem (Figura 38). Pelas médias verifica-se que, apesar do efeito da porosidade das placas na resistência à tração, foi possível transferir em parte a maior resistência da fibra da madeira de garapeira para o compósito.

FIGURA 38 - VALORES MÉDIOS E AMPLITUDE DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA CADA TIPO DE SERRAGEM USADA EM MISTURADOR DRAIS



4.3.3.3 Propriedades de flexão estática

As propriedades de flexão estática analisadas nesse experimento foram resistência à flexão na força máxima, alongamento e MOE à flexão. Da mesma forma que ocorreu para a resistência à tração, não houve correlação significativa entre a resistência à flexão e a proporção de serragem. Por outro lado, verificou-se que o alongamento e o MOE se correlacionaram com a proporção de serragem.

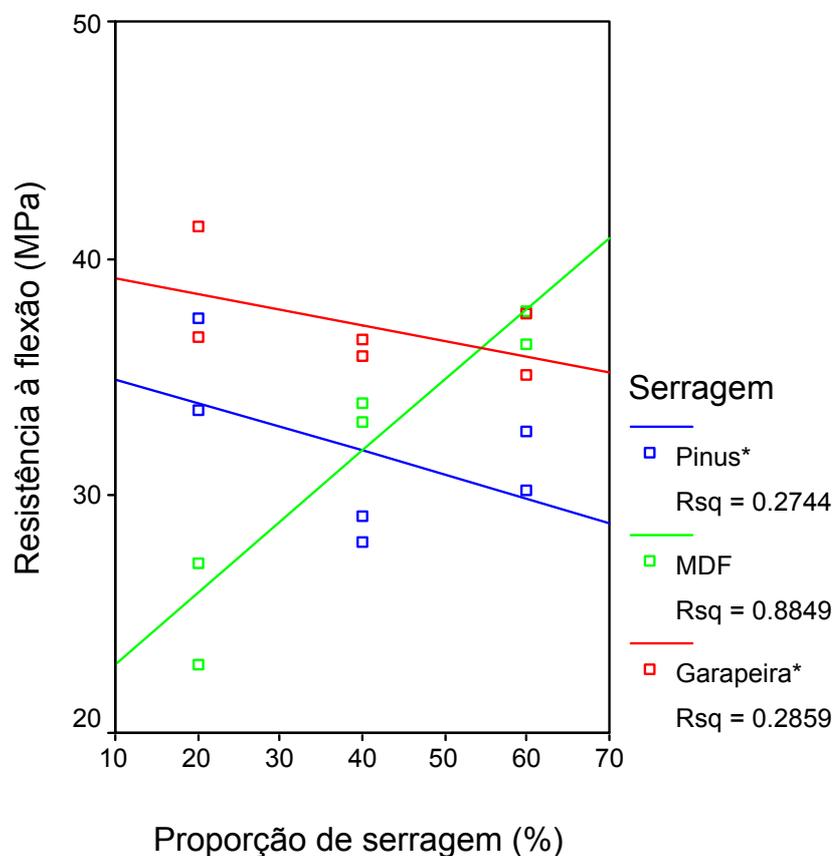
Foram encontradas correlações significativas (Tabela 29) entre as propriedades de resistência à tração e de resistência à flexão, indicando que essas propriedades se comportam de maneira semelhante em relação a proporção de serragem e ao tipo de serragem utilizados. Em geral, se verifica que as propriedades de flexão estática têm comportamento semelhante às propriedades de tração, com a variação do teor de serragem nos compósitos. Também se verifica que esses efeitos são mais pronunciados nas propriedades de flexão estática do que nas de tração.

Em seu trabalho, ROBIN & BRETON (2001) verificaram que a resistência à flexão aumenta com o aumento da proporção de serragem no compósito. Esse efeito foi mais pronunciado nos compósitos em que a serragem foi previamente tratada com calor, em atmosfera controlada, do que nos compósitos não tratados.

BALASURIYA et al. (2001), usando dois tipos de HDPE, de médio e baixo índice de fluidez (MFI), em compósitos com partículas de *Pinus radiata*, processados em extrusora dupla-rosca ou por misturador rotacional, verificaram que a resistência à flexão se comportou de maneira diferente em relação ao teor de madeira usado, dependendo da viscosidade do HDPE e do tipo de processo realizado. Da mesma forma, foi verificado um comportamento diferente para o MOE, no entanto, para essa propriedade houve um aumento do MOE com o aumento da proporção de madeira para os compósitos extrusados.

Na Figura 39 é apresentado o gráfico da resistência à flexão em função da proporção de serragem, para cada tipo de serragem usada. De maneira diferente da resistência à tração, se verifica que os valores médios encontrados para a serragem de garapeira foram semelhantes nas três proporções de serragem, com tendência de diminuir com o aumento da sua proporção.

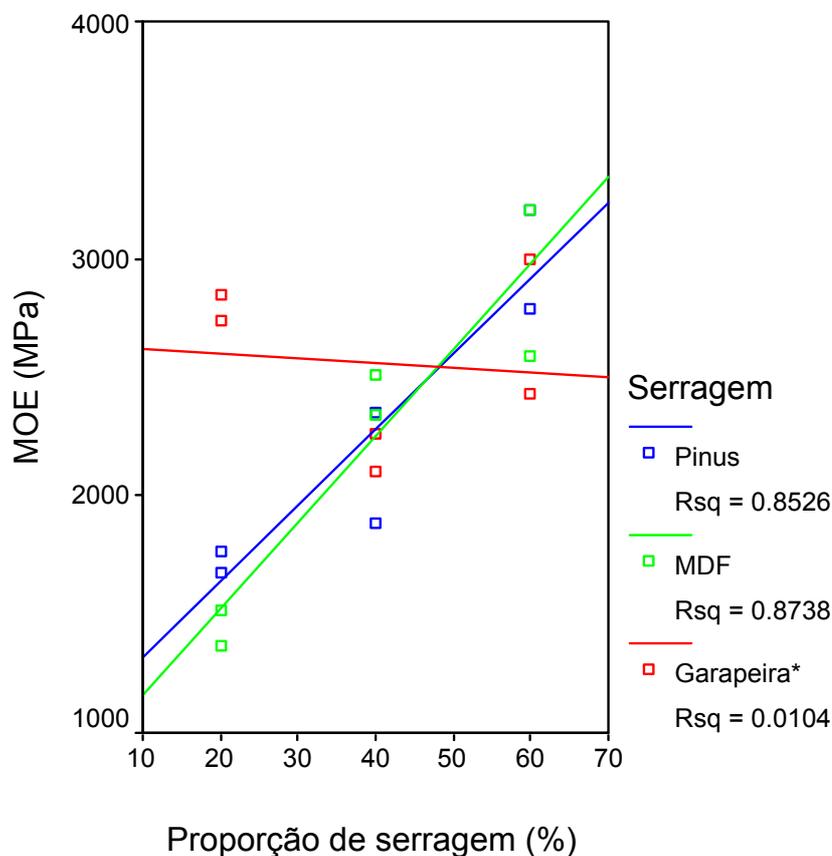
FIGURA 39 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM, PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS



NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

Na Figura 40 é apresentado o gráfico do MOE em função da proporção de serragem, para cada tipo de serragem utilizada. O alongamento à flexão apresentou um comportamento semelhante e inversamente proporcional ao MOE, confirmado pelo coeficiente de correlação, igual à -0,782 (Tabela 29), encontrado entre essas propriedades. Um aumento da proporção de serragem causa um aumento do MOE para as serragens de pinus e de MDF. Verifica-se também que a interação entre pinus e MDF é pequena, pois as linhas de regressão são quase paralelas. Para serragem de Garapeira, os valores médios decrescem quando a proporção de serragem sobe de 20% para 40% e voltam a subir na proporção de 60%.

FIGURA 40 - MOE À FLEXÃO ESTÁTICA EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS



NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

A Tabela 31 apresenta os valores médios das propriedades de resistência à flexão para os diferentes tipos de serragem utilizados. Os compósitos confeccionados com serragem de garapeira apresentaram uma resistência à flexão maior que os compósitos confeccionados com os outros tipos de serragem. Acredita-se que esse comportamento é função da maior resistência mecânica dessa madeira em relação ao MDF e ao pinus. Embora a análise geral dos resultados mostrou que a porosidade das placas, provocada pela formação de bolhas, influenciou os valores das propriedades mecânicas, houve uma transferência da resistência das fibras de madeira para o compósito, que é proporcional à densidade da madeira. Esse fato foi verificado também na resistência à tração. Como a madeira de garapeira apresenta uma densidade maior que a madeira de pinus e que o MDF, conseguiu transferir mais esforço para o compósito.

TABELA 31 - MÉDIAS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO, ALONGAMENTO E MOE, OBTIDAS PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM USADOS NO EXPERIMENTO COM MISTURADOR DRAIS

Tipo de serragem	Nº de placas	Resistência à flexão (MPa)	Alongamento à flexão (%)	MOE (MPa)
MDF	6	31,87	3,39	2254,33
Pinus	6	31,88	3,25	2279,00
Garapeira	6	37,19	3,49	2562,17

Com base nos resultados obtidos, considerando que a resistência à tração e à flexão não apresentaram correlação significativa com a proporção de serragem e o MOE sim, é possível indagar quais dessas propriedades mecânicas melhor demonstram a influência da incorporação de serragem na resistência dos compósitos.

Sabe-se que para madeira e painéis de madeira, a análise dos ensaios de flexão estática em geral mostram uma correlação entre o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE). No caso dos polímeros termoplásticos, a resistência à flexão na força máxima ou na ruptura em geral não se correlacionam com o MOE. Para compósitos polímero/madeira, a resistência na força máxima e a resistência na ruptura (MOR) dão valores iguais ou muito próximos, mas a maioria dos trabalhos onde se analisa misturas de poliolefinas com madeira não consegue estabelecer uma correlação entre resistência à flexão e MOE ou resistência à tração e E, especialmente na falta de um agente de acoplamento adequado (ROBIN & BRETON, 2001; BENGTTSSON et al., 2005; STARK & ROWLANDS, 2003; BLEDZKI et al., 2005; COLOM et al., 2003; SELKE & WICHMAN, 2004; STARK, 1999).

Em alguns desses trabalhos também é possível verificar que o MOE ou o E apresentam uma correlação diretamente proporcional com a proporção de serragem, enquanto a resistência à flexão ou à tração não. Em BENGTTSSON et al (2005), verifica-se que nos compósitos onde foi usado o agente de acoplamento, tanto os valores de resistência à tração como os do E aumentam com o aumento da proporção de serragem, enquanto nos compósitos sem o agente, apenas o E apresenta esse comportamento.

No trabalho de ROBIN & BRETON (2001) se verifica que tanto os valores de MOE como os do E aumentam com o aumento do teor de serragem, enquanto com os valores de resistência à tração e à flexão isso não ocorre. Em SELKE &

WICHMAN (2004) também se verifica que o aumento da proporção de serragem causa um aumento do E, enquanto não acontece o mesmo para resistência à tração.

HWANG et al. (1999) e KAMDEM et al (2003), no entanto, apresentam em seus trabalhos valores de MOR e de MOE que se correlacionam entre si. HWANG et al. (1999) analisaram diferentes variáveis na confecção de compósitos de polietileno virgem e reciclado com fibras de pinus, confeccionando compósitos com esses materiais colados com resina uréia-formaldeído. KAMDEM et al (2003) misturaram HDPE reciclado com diferentes tipos de serragem de pinus, tratada com CCA, em misturador de laboratório Papenmeier. Das misturas foram confeccionadas placas por compressão e determinadas diversas propriedades, entre elas as propriedades de flexão estática.

No presente trabalho, atribui-se o fato de não haver uma correlação entre resistência à tração ou à flexão e a proporção de serragem, em parte por se ter usado diferentes tipos de serragem e em parte devido à porosidade das placas causada pela formação de bolhas. Por outro lado, o fato de se encontrar essa correlação entre o MOE e a proporção de serragem mostra que a porosidade das placas tem menor influência sobre o comportamento do material na faixa de deformação elástica do mesmo. Por essas razões e comparando com os resultados dos trabalhos anteriormente citados, pode-se inferir que o MOE melhor expressa a influência da proporção de serragem nas propriedades de flexão estática das placas do que a resistência à flexão na força máxima.

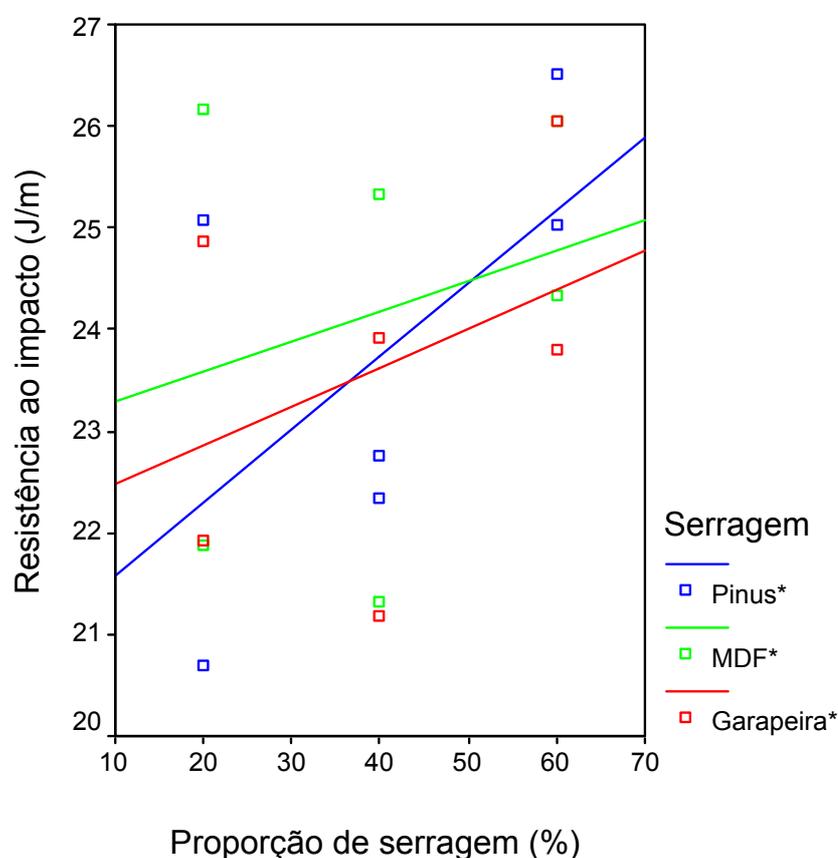
4.3.3.4 Resistência ao impacto

Os valores médios de resistência ao impacto não apresentaram diferença entre os fatores proporção de serragem e tipo de serragem. Na Tabela 32 são apresentados os valores médios de resistência ao impacto para esses dois fatores, enquanto na Figura 41 é apresentado o gráfico da resistência ao impacto em função da proporção de serragem para cada tipo de serragem usada. Verifica-se que, embora não sendo possível determinar uma influência da proporção de serragem na resistência ao impacto dos compósitos, existe uma tendência do aumento dessa propriedade com o aumento da proporção de serragem.

TABELA 32 - VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM E PROPORÇÕES DE SERRAGEM UTILIZADOS EM DRAIS

Tipo de serragem	Número de placas	Impacto (J/m)	Prop. de serragem (%)	Número de placas	Impacto (J/m)
Garapeira	6	23,62	20	6	23,43
Pinus	6	23,73	40	6	22,80
MDF	6	24,18	60	6	25,30

FIGURA 41 - RESISTÊNCIA AO IMPACTO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA EM MISTURADOR DRAIS



NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

Ao contrário dessa tendência observada, em geral, os valores de resistência ao impacto sofrem influência negativa da proporção de serragem, quando se trabalha com compósitos de termoplásticos com madeira. Na medida que se adiciona uma maior proporção de serragem, diminui a resistência ao impacto (ROBIN & BRETON, 2001).

Por outro lado, SELKE & WICHMAN (2004) encontraram diferente comportamento da resistência ao impacto usando HDPE reciclado e fibras de *spruce*. Os autores trabalharam tanto com HDPE virgem como com reciclado, e constataram que para o HDPE virgem a resistência ao impacto decresce com o aumento da proporção de fibras no compósito. Ao contrário, a incorporação de até 30% de fibras em HDPE reciclado causou um aumento da resistência ao impacto, que decresceu na proporção de 40% de fibras. Embora esse efeito não tenha sido completamente entendido, acredita-se que o fato dos compósitos serem superiores ao HDPE sem fibras se deva à incompatibilidade entre os diferentes tipos de HDPE reciclado, resultando em baixos valores de resistência ao impacto para as misturas de HDPE sem fibras de madeira.

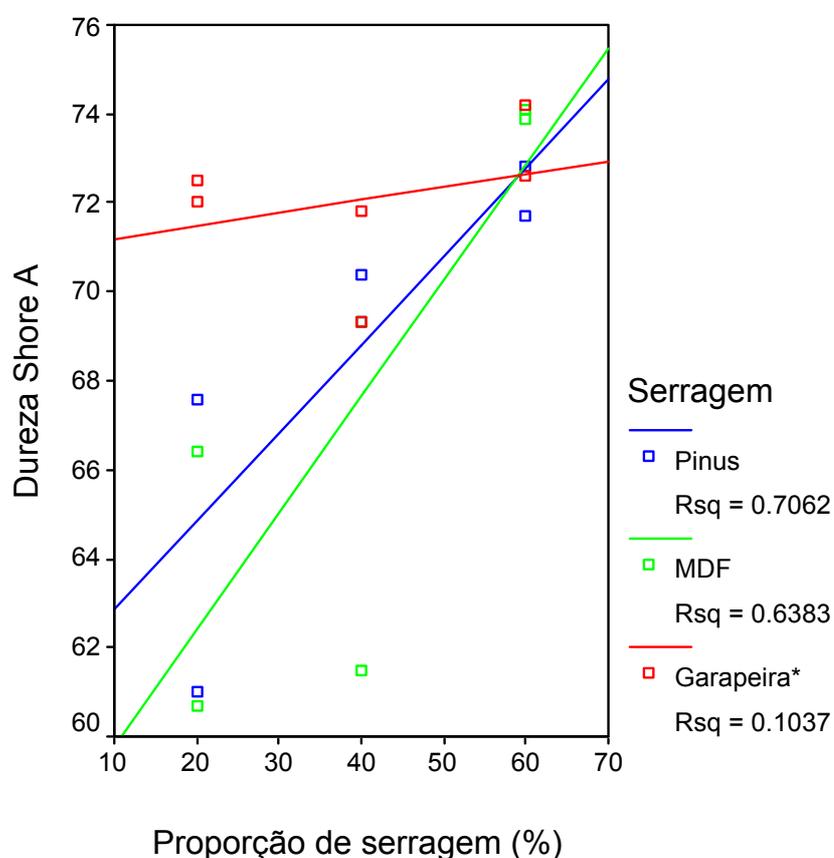
BALASURIYA et al. (2001), também encontraram diferente comportamento da resistência ao impacto em relação à proporção de madeira no compósito quando compararam essa propriedade entre compósitos confeccionados com HDPE de baixa e média viscosidade, submetidos a dois tipos de processamento. Enquanto para os compósitos de HDPE extrusados de baixo índice de fluidez e para os compósitos de baixo e médio índice de fluidez misturados em misturador rotacional, um aumento da proporção de madeira causou uma diminuição da resistência ao impacto, para os compósitos confeccionados com médio índice de fluidez extrusados essa propriedade aumentou com o aumento da proporção de madeira de 10% para 40%, voltando a diminuir de 40% a 70% de proporção.

Acredita-se que a dispersão de valores médios de resistência ao impacto das placas confeccionadas com a mesma mistura podem ter, em parte, causado um desvio na tendência observada dessa propriedade em relação à proporção de serragem. Essa dispersão também é causada pela porosidade das placas, mas um efeito também significativo pode ser a dispersão da serragem na matriz polimérica. Se essa dispersão não for homogênea, haverá regiões com maior proporção da matriz do que outras. Como o ensaio de impacto atua numa região específica do corpo-de-prova, tanto a porosidade da placa como a distribuição da serragem na matriz podem ter efeito na resistência ao impacto dessa região.

4.3.3.5 Dureza

A dureza dos compósitos apresentou uma correlação significativa com diversas propriedades mecânicas, exceto com as resistências à tração, à flexão e ao impacto. Também, apresentou uma correlação significativa com a proporção de serragem (seção 4.3.3 - Tabela 29). Tendo em vista que a dureza das madeiras utilizadas é maior que a dureza do HDPE, era esperado que essa propriedade tivesse seus valores aumentados com o aumento da proporção de serragem. A Figura 42 apresenta o gráfico da dureza do material em função da proporção de serragem, para cada tipo de serragem estudado. Verifica-se, também para essa propriedade, que o seu comportamento em função da proporção de serragem difere na espécie Garapeira, em relação aos outros dois tipos de serragem usados.

FIGURA 42 - VALORES DE DUREZA EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM, PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADO EM MISTURADOR DRAIS



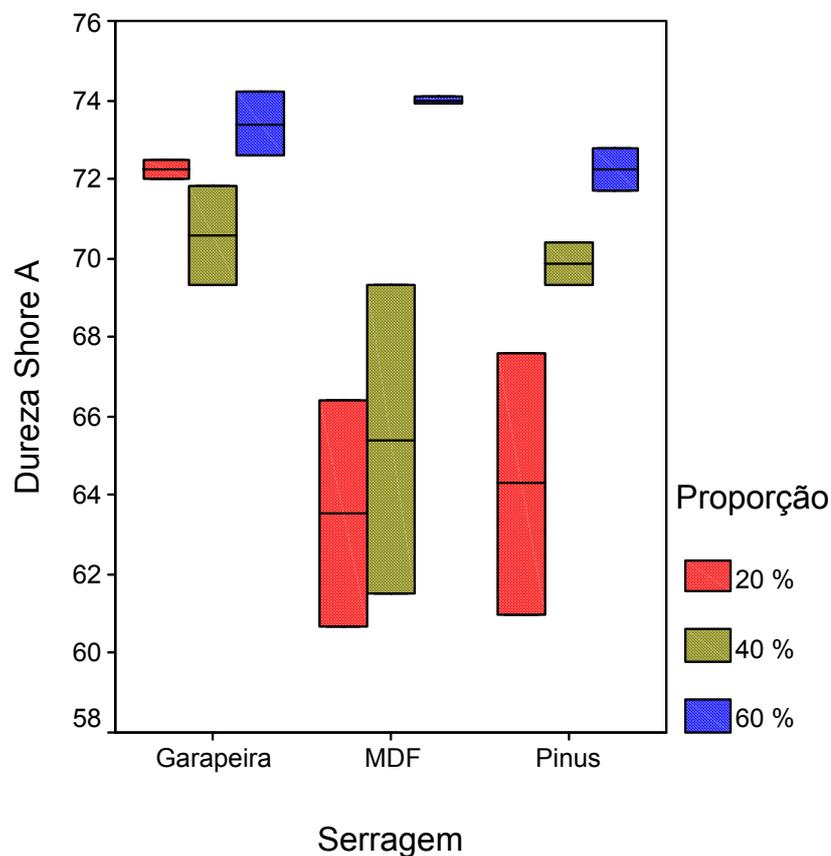
NOTA: *Regressão não significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

O fato da dureza dos compósitos apresentar uma correlação significativa com o alongamento e o MOE, tanto dos ensaios de tração como de flexão, mostra que essa propriedade depende da capacidade do material em se deformar. Um aumento do alongamento, corresponde a uma diminuição da dureza e um aumento do MOE corresponde a um aumento da dureza. Dessa forma, pode-se dizer que a dureza do material aumenta com o aumento da força necessária para deformá-lo.

Com relação ao comportamento da dureza do material em cada uma das espécies estudadas, novamente se nota que a espécie garapeira não segue o mesmo padrão que os outros dois tipos de serragem. A Figura 43 apresenta os valores médios e a amplitude dos valores observados de dureza para cada um dos tipos de serragem, separados por cada proporção de serragem utilizada. Pode-se verificar que para algumas placas a amplitude dos valores observados de dureza é elevada. O fato do ensaio de dureza utilizar um pequeno corpo-de-prova e de se utilizar apenas um corpo-de-prova de cada placa, pode ter contribuído para essa variação. Já foi comentado que o processo utilizado nesse ensaio pode promover variações entre placas de mesma mistura e mesmo dentro de uma mesma placa.

Por outro lado, nota-se uma tendência das placas confeccionadas com a espécie garapeira apresentarem maiores valores médios de dureza para todas as proporções de serragem usadas, em especial para as proporções de 20% e 40% de serragem. Novamente aqui, atribui-se esse fato a maior densidade da madeira dessa espécie, em relação à espécie pinus e ao MDF. Em geral, quanto maior a densidade da madeira, maior sua dureza (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; BODIG & JAYNE, 1982; DIAS & LAHR, 2004). Assim, conclui-se que houve uma transferência da maior resistência da fibra de madeira para o compósito, causada pela adesão entre as fases de fibra e matriz. Embora essa adesão possa não ter ocorrido de forma ideal, foi proporcional para cada tipo de serragem utilizada.

FIGURA 43 - VALORES MÉDIOS DE DUREZA DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS EM DRAIS E AMPLITUDE DE VALORES PARA CADA TIPO E PROPORÇÃO DE SERRAGEM



4.4 EXPERIMENTO COM MISTURAS EXTRUSADAS

4.4.1 Cristalinidade dos Compósitos Extrusados

Na Tabela 33 são apresentadas as entalpias relativas à primeira fusão, segunda fusão e cristalização, juntamente com suas temperaturas, para os compósitos confeccionados com os diferentes tipos de serragem, em extrusoras mono e dupla-rosca. As amostras analisadas foram as que continham 30% de serragem e 70 % de v-HDPE. Os valores das entalpias de fusão dos compósitos foram normalizados para comparação com v-HDPE puro.

TABELA 33 - VALORES DE ENTALPIA E DE TEMPERATURA PARA A PRIMEIRA FUSÃO, SEGUNDA FUSÃO E CRISTALIZAÇÃO, DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE EM EXTRUSORAS MONO E DUPLA ROSCA

Amostras	ΔH_{F1} (J/G) T_{p1} (°C)	X_{CF1}	ΔH_c (J/G) T_{PC} (°C)	ΔH_{F2} (J/G) T_{P2} (°C)	X_{CF2}
v-HDPE puro	----	----	182,6; 114,3	180,5; 132,3	0,61
MDF 30% DR	117,7; 132,2	0,57	135,3; 114,7	135,4; 133,9	0,66
Eucalipto 30% DR	105,7; 132,5	0,51	148,2; 114,2	146,6; 133,8	0,71
Pinus 30% DR	113,1; 132,3	0,55	139,5; 114,5	138,1; 133,8	0,67
MDF 30% MR	134,1; 133,3	0,65	143,9; 115,6	142,4; 134,4	0,69
Aglomerado 30% MR	123,2; 131,8	0,60	152,6; 113,4	150,5; 132,2	0,73
Eucalipto 30% MR	112,7; 133,5	0,54	137,1; 115,9	135,9; 135,3	0,66
Pinus 30% MR	116,9; 132,3	0,56	144,1; 113,9	142,4; 134,3	0,69

NOTAS: DR = Dupla rosca; MR = Mono rosca;

ΔH_{F1} = entalpia de fusão do primeiro aquecimento;

T_{p1} = temperatura de fusão do primeiro aquecimento;

X_{cf1} = índice de cristalinidade do primeiro aquecimento;

ΔH_c = entalpia de cristalização;

T_{pc} = temperatura de cristalização;

ΔH_{f2} = entalpia de fusão do segundo ciclo de aquecimento;

T_{p2} = temperatura de fusão do segundo aquecimento;

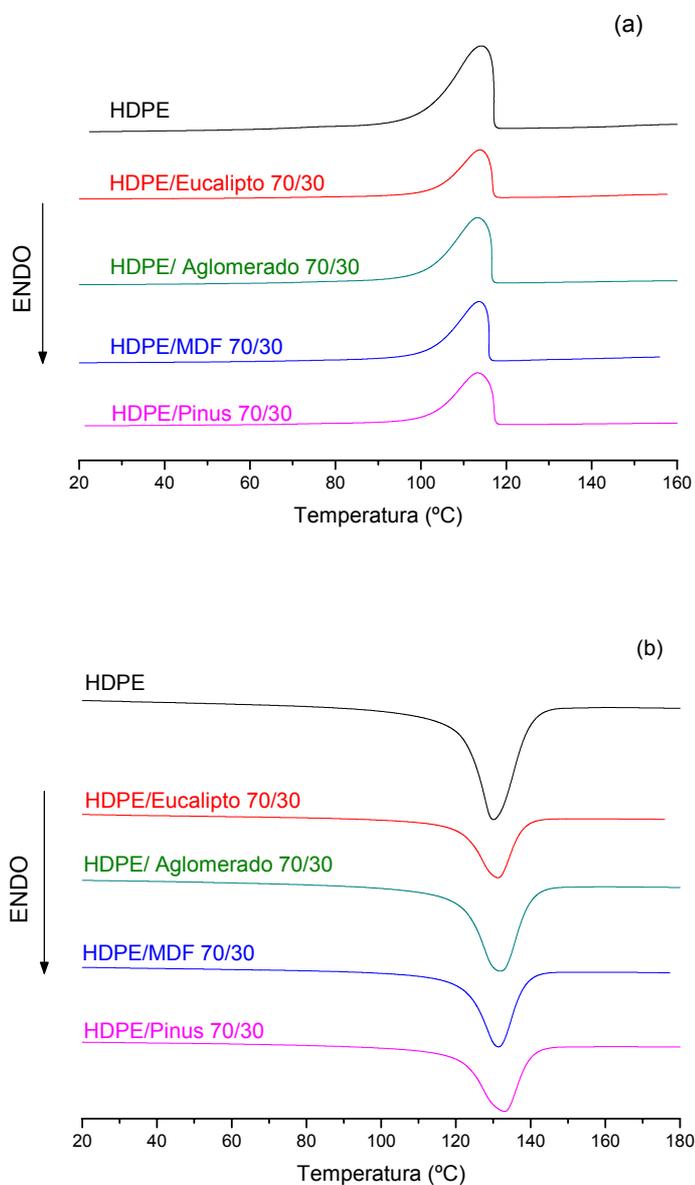
X_{cf2} = índice de cristalinidade do segundo aquecimento.

O valor de ΔH^0 padrão, considerando o polietileno 100% cristalino, foi de 293 J/g (SILVA et al., 2001). Para o polietileno puro foi encontrado um valor para a temperatura do pico na cristalização de 114,3 °C e um ΔH_c de 182,6 J/g. Para o segundo aquecimento foi encontrada uma temperatura de fusão de 132,3 °C e uma energia ΔH_c de 180,5 J/g. O índice de cristalinidade foi calculado em 0,61.

Os valores das temperaturas de fusão referentes ao primeiro e segundo ciclo de aquecimento sofreram poucas alterações, quando comparadas ao v-HDPE puro. As amostras quando foram submetidas ao segundo aquecimento re-organizaram suas estruturas e apresentaram uma variação de entalpia maior. Todos os compósitos processados nas duas extrusoras apresentaram índice de cristalinidade maior que o v-HDPE puro.

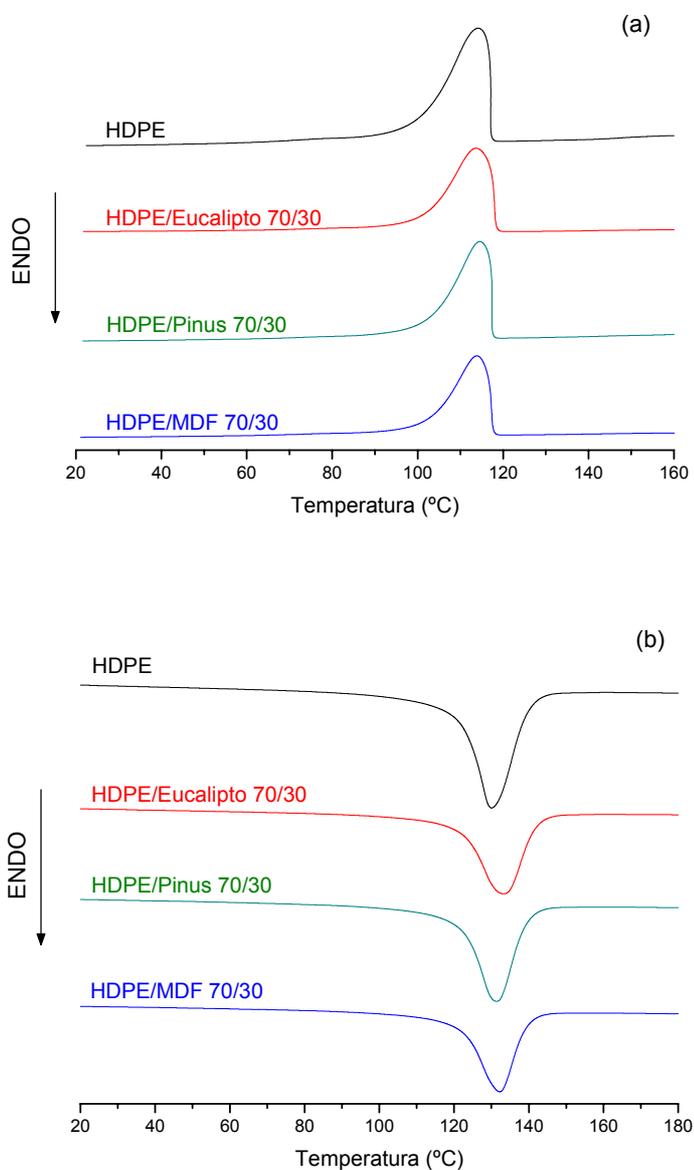
Na Figura 44 são apresentados os termogramas de DSC referentes à cristalização e segunda fusão dos compósitos preparados em extrusora mono-rosca.

FIGURA 44 - TERMOGRAMAS DE DSC DESLOCADOS VERTICALMENTE POR UM FATOR DE ESCALA ARBITRÁRIO, PARA AS AMOSTRAS COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE PREPARADAS EM EXTRUSORA MONO ROSCA: (a) CRISTALIZAÇÃO, (b) SEGUNDA FUSÃO



Na Figura 45 são mostrados os termogramas de DSC referente a cristalização e segunda fusão para os compósitos preparados em extrusora dupla-rosca .

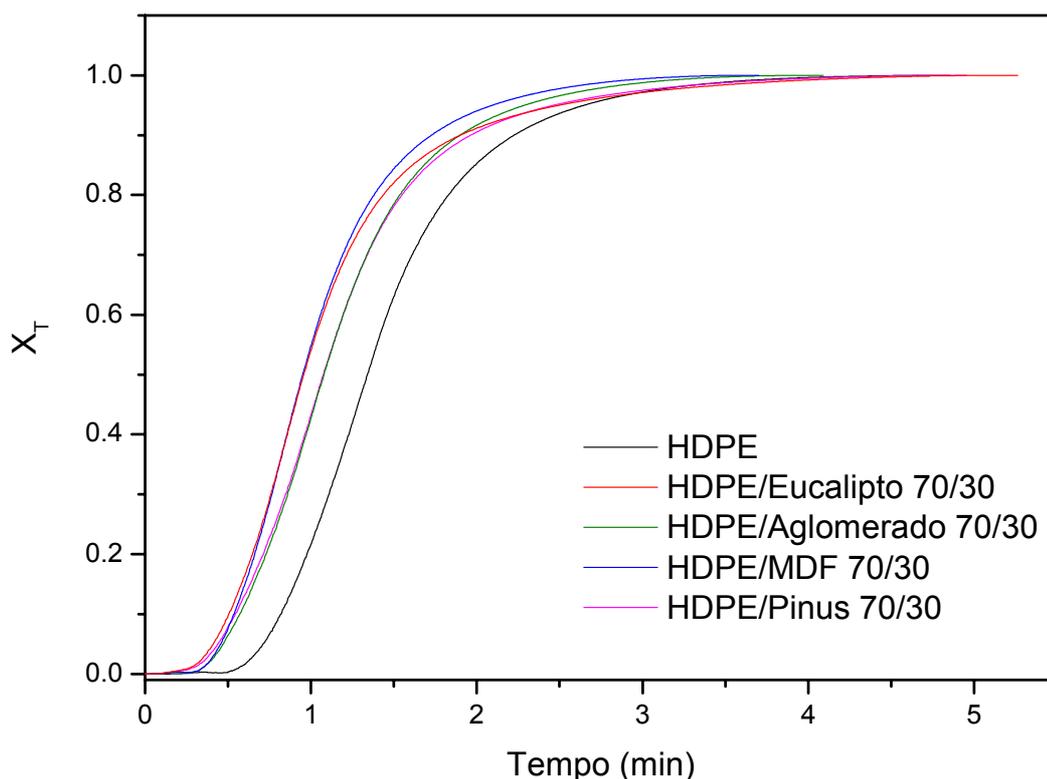
FIGURA 45 - TERMOGRAMAS DE DSC DESLOCADOS VERTICALMENTE POR UM FATOR DE ESCALA ARBITRÁRIO, PARA AS AMOSTRAS COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE PREPARADAS EM EXTRUSORA DUPLA ROSCA: (a) CRISTALIZAÇÃO, (b) SEGUNDA FUSÃO



Com relação às temperaturas de cristalização e segunda fusão para os compósitos preparados em extrusora mono e dupla-rosca, foram observadas pequenas alterações, fato que pode estar correlacionado com pequenas alterações na estrutura cristalina do v-HDPE.

Na Figura 46 é mostrada a cristalinidade relativa como função do tempo de cristalização para os compósitos confeccionados em extrusora mono-rosca.

FIGURA 46 - CRISTALINIDADE RELATIVA PARA OS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS EM EXTRUSORA MONO ROSCA, COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE

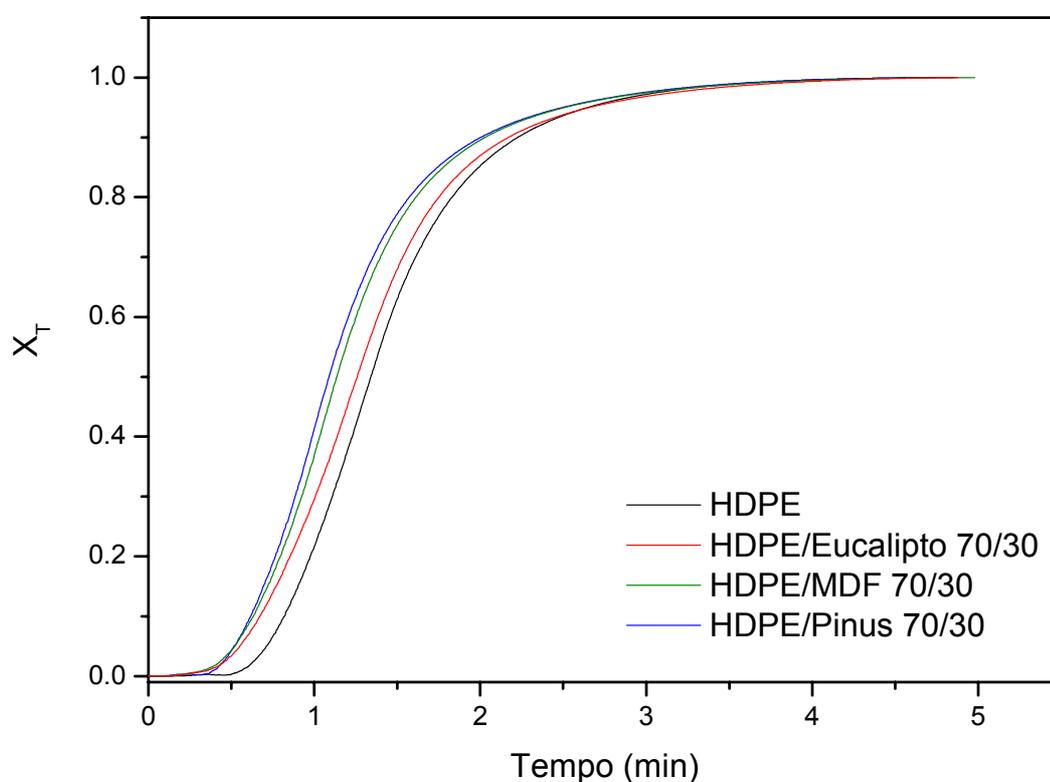


Em geral, todos os compósitos preparados em extrusora mono-rosca tiveram uma tendência de agir como carga de reforço e agente nucleante, conforme sugerido anteriormente. Para os compósitos fabricados com MDF, foi observado um menor tempo de cristalização, fato que pode estar relacionado ao menor tamanho de partícula encontrado para este tipo de serragem. Porém, o crescimento cristalino inicial para os compósitos fabricados com eucalipto foi semelhante, somente diferindo quanto ao tempo de cristalização, que foi maior que o v-HDPE puro e os demais compósitos. A nível molecular, as cargas de reforço em um sistema compósito têm ação de nuclear e alterar a estrutura cristalina do material. Esse

fenômeno foi observado por CARVALHO et al. (2001), que estudaram os efeitos na cinética de cristalização com a adição de teores de até 5% de talco em polipropileno.

Na Figura 47 é ilustrada a cristalinidade relativa como função do tempo de cristalização, para os compósitos confeccionados em extrusora dupla-rosca.

FIGURA 47 - CRISTALINIDADE RELATIVA PARA OS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS EM EXTRUSORA DUPLA ROSCA, COM v-HDPE PURO E COM 30% DE SERRAGEM E 70% DE v-HDPE



Como observado para o sistema de compósitos confeccionados em extrusora mono-rosca, todas as espécies de madeira agem como nucleantes, ou seja, fazem com que o polímero consiga atingir, em tempos menores, uma maior proporção de material cristalino.

No início da cristalização dos compósitos há a formação de cristais maiores, o que acelera a cristalização. Ao final do processo, esses cristais dificultam a

organização das cadeias menores, causando um aumento no tempo total de cristalização. Como o fluxo cisalhante foi menor na extrusora mono-rosca, em comparação com a dupla-rosca, acredita-se ter havido uma menor fragmentação nas partículas durante o processamento na mono-rosca. Esse fato pode ter contribuído para a formação de cristais maiores, mas em menor número. Com isso, a cristalinidade relativa ocorre a uma maior velocidade de cristalização até aproximadamente 90% do processo, no entanto, a cristalinidade total tem seu tempo de cristalização aumentado.

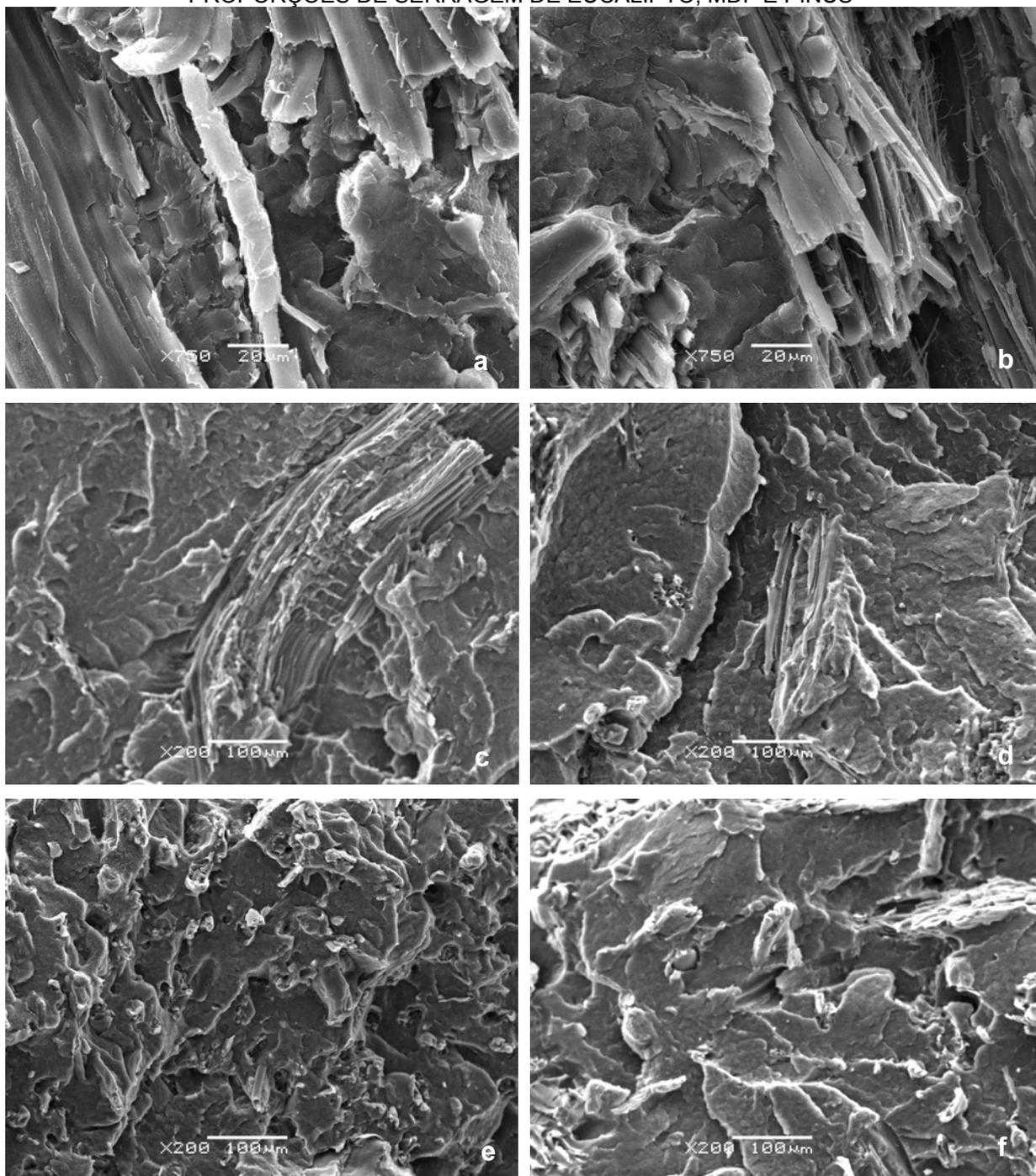
4.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 48 são apresentadas algumas micrografias da microscopia eletrônica de varredura (SEM) da fratura de amostras dos compósitos confeccionados com os dois tipos de extrusoras. Pode-se verificar uma influência do tipo de serragem usada e do tipo de processo empregado na dispersão das fibras na matriz polimérica.

Nas serragens de eucalipto e de aglomerado houve a formação de agregados de fibras, que não se dispersaram, sendo esse efeito mais pronunciado para a serragem de eucalipto (a). Com uso da extrusora de dupla-rosca esses agregados também ocorreram, mas em geral em menores proporções (a, b, c, d).

Comparando a dispersão da serragem de eucalipto, em relação às serragens de pinus e MDF, nos compósitos com 30% de serragem confeccionados em extrusora dupla-rosca (e, f), verifica-se que não ocorre a formação de agregados de fibras e a matriz polimérica apresenta um aspecto homogêneo. Pode-se ver também que, para serragem de pinus, a homogeneidade da matriz é ainda maior, com menor ocorrência de camadas sobrepostas. Por outro lado, em todos os compósitos nota-se uma boa adesão da serragem na matriz polimérica.

FIGURA 48 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS COM MONO E DUPLA ROSCA E DIFERENTES PROPORÇÕES DE SERRAGEM DE EUCALIPTO, MDF E PINUS



NOTAS: a = 30Eucalipto/70HDPE-mono; b = 30Eucalipto/70HDPE-dupla; c = 20Eucalipto/80HDPE-mono; d = 20Eucalipto/80HDPE-dupla; e = 30MDF/70HDPE-dupla; f = 30Pinus/70HDPE-dupla

Na Figura 49 são apresentadas as micrografias dos compósitos confeccionados com serragem de aglomerado e de pinus, na proporção de 30%, e também dos compósitos confeccionados com 40% de proporção da serragem de MDF.

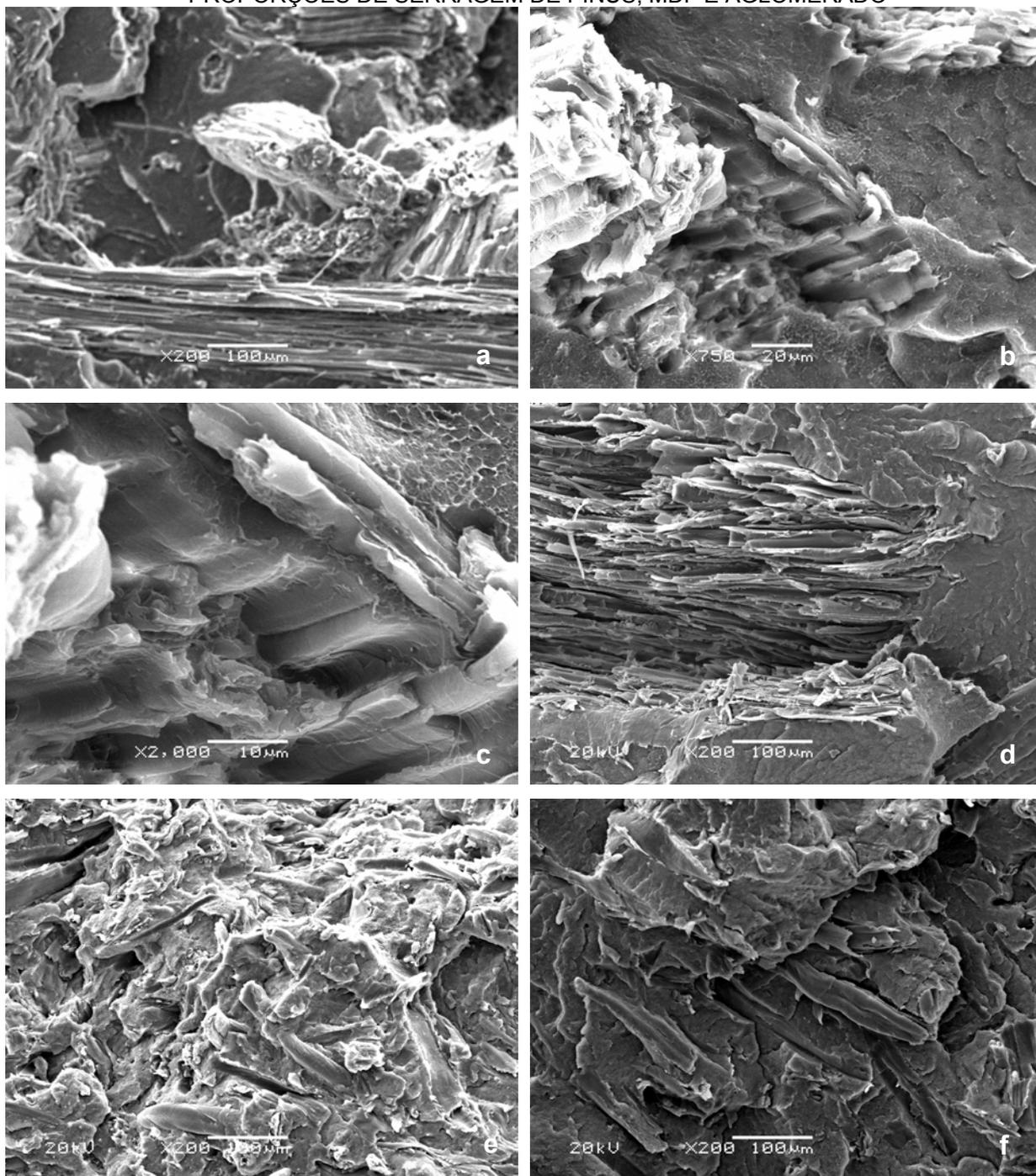
Verifica-se que a serragem de aglomerado também apresentou agregados na matriz polimérica (a), de tamanho inferior aos encontrados nos compósitos com serragem de eucalipto. Embora menores, esses agregados parecem ter menor adesão nesse tipo de serragem do que na serragem de eucalipto, pois é possível verificar regiões em que a serragem foi destacada da matriz polimérica na fratura (b, c).

Nos compósitos confeccionados com pinus, em extrusora mono-rosca (d), verifica-se que a matriz possui aspecto semelhante às misturas processadas com essa espécie na dupla-rosca. Por outro lado, é possível verificar a existência de alguns agregados de fibras, como os que aparecem nessa micrografia.

Nos compósitos com 40% de MDF (e) foi possível observar uma estrutura da matriz semelhante aos compósitos desse tipo de serragem com menor proporção, mas com marcante aparecimento de camadas sobrepostas. Esse aspecto emaranhado não ocorre nesse tipo de serragem quando o compósito foi processado em extrusora mono-rosca (f).

Da mesma forma que na Figura 48, todas as micrografias apresentadas mostram que houve boa adesão entre as fases de fibras e de matriz. No agregado de fibras em “ d “ se verifica que ocorrem fibras quebradas, mostrando que as fibras sofreram fratura e se mantiveram ligadas ao v-HDPE.

FIGURA 49 - MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS COM MONO E DUPLA ROSCA E DIFERENTES PROPORÇÕES DE SERRAGEM DE PINUS, MDF E AGLOMERADO



NOTAS: a, b, c = 30Agglomerado/70HDPE-mono; d = 20Pinus/70HDPE-mono; e = 40MDF/60HDPE-dupla; f = 30MDF/70HDPE-mono

4.4.3 Propriedades Físico-Mecânicas dos Compósitos Fabricados com Misturas Extrusadas

As propriedades físico-mecânicas avaliadas no experimento com misturas extrusadas foram densidade aparente, resistência à tração, resistência à flexão, alongamento à flexão, módulo de elasticidade à flexão (MOE) e resistência ao impacto. A Tabela 34 apresenta a correlação de Pearson entre essas propriedades e a variável quantitativa de produção analisada: proporção de serragem.

Verifica-se que a proporção de serragem apresentou correlação significativa com todas as propriedades mecânicas e com a densidade dos compósitos. A densidade dos corpos-de-prova, por sua vez, também apresentou correlação significativa com todas as propriedades mecânicas, o que a torna uma propriedade física de importância para caracterização dos compósitos.

Em relação ao experimento com misturador tipo Drais, pode-se dizer que esse experimento apresentou a densidade dos corpos-de-prova como uma variável que exprime melhor as propriedades mecânicas dos compósitos e que apresenta maior correlação com a proporção de serragem.

NA CONTINUA

Tabela 35 são apresentados os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas e para a densidade, dos corpos-de-prova confeccionados com os diferentes tipos serragem de madeira e de seus derivados, nas diferentes proporções e nos dois processos estudados.

Algumas causas podem ser apontadas para a melhor correlação entre as propriedades físico-mecânicas nesse experimento: a melhor adesão entre as fases de fibra e de matriz proporcionada pela maior pressão utilizada no processo de injeção em comparação com o processo de compressão; a menor variância experimental que o processo de extrusão/injeção (Tabela 36) proporcionou em relação ao processo mistura termocinética/compressão (Tabela 30). Não se pode negligenciar, no entanto, que esse experimento trabalhou numa faixa de proporção de serragem compreendida entre 20% e 40% de serragem, enquanto no experimento com misturador tipo Drais essa faixa foi de 20% a 60% de serragem.

TABELA 34 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS, CONFECCIONADOS COM DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM E DOIS TIPOS DE EXTRUSORAS, E A PROPORÇÃO DE SERRAGEM

	Proporção de serragem	Densidade	Resistência à tração	Resistência à flexão	Alongamento à flexão	MOE à flexão	Resistência ao Impacto
Proporção de Serragem	1						
Densidade	0,955*	1					
Resistência à Tração	0,639*	0,580*	1				
Resistência à Flexão	0,854*	0,814*	0,896*	1			
Alongamento à Flexão	-0,637*	-0,620*	-0,262*	-0,486*	1		
MOE à Flexão	0,799*	0,798*	0,652*	0,833*	-0,571*	1	
Resistência ao Impacto	-0,426*	-0,288*	-0,307*	-0,324*	0,139	-0,178	1

*Correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste "t".

CONTINUA

TABELA 35 - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DENSIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA DAS DIFERENTES MISTURAS DE SERRAGEM/v-HDPE CONFECCIONADOS COM MONO E DUPLA ROSCA

Mistura	Material	Proporção de serragem (%)	Processo	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Alongamento à flexão (%)	MOE à flexão (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)
0	v-HDPE puro	0	injeção	0,906 (0,008)	19,36 (2,18)	19,45 (0,21)	7,68 (1,14)	568,0 (54,3)	62,01 (4,88)
1	Aglomerado	20	mono	0,959 (0,004)	24,37 (0,21)	30,63 (0,37)	6,15 (0,33)	1095,6 (60,1)	49,78 (4,46)
2	Aglomerado	30	mono	0,994 (0,002)	25,70 (0,37)	40,15 (0,71)	5,52 (0,34)	1809,9 (144,2)	53,00 (1,79)
3	Eucalipto	20	dupla	0,959 (0,002)	26,23 (0,29)	32,16 (0,25)	6,32 (0,30)	1318,1 (194,7)	61,89 (10,75)
4	Eucalipto	20	mono	0,963 (0,003)	23,30 (0,56)	30,24 (0,65)	6,14 (0,53)	1182,0 (132,7)	68,09 (7,05)
5	Eucalipto	30	dupla	0,989 (0,002)	28,57 (0,36)	39,51 (0,65)	6,02 (0,18)	1716,7 (68,2)	54,21 (2,42)
6	Eucalipto	30	mono	1,007 (0,004)	25,44 (0,65)	38,76 (0,47)	5,64 (0,27)	1638,3 (325,9)	59,88 (3,60)
7	MDF	20	dupla	0,950 (0,003)	28,35 (0,48)	36,61 (0,26)	6,16 (0,21)	1509,4 (24,0)	37,77 (1,69)
8	MDF	20	mono	0,947 (0,006)	23,49 (1,04)	28,34 (0,82)	7,00 (1,00)	969,7 (138,1)	37,12 (1,90)

NOTA: Valores entre parênteses referem-se ao Desvio-Padrão

CONCLUSÃO

TABELA 35 - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DENSIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA DAS DIFERENTES MISTURAS DE SERRAGEM/v-HDPE CONFECCIONADOS COM MONO E DUPLA ROSCA

Mistura	Material	Proporção de serragem (%)	Processo	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Alongamento à flexão (%)	MOE à flexão (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)
9	MDF	30	dupla	0,978 (0,006)	32,20 (0,81)	42,69 (0,25)	5,96 (0,24)	1257,2 (441,8)	39,62 (1,13)
10	MDF	30	mono	0,993 (0,004)	22,76 (0,57)	33,89 (0,81)	5,80 (0,45)	1216,1 (93,6)	34,77 (1,62)
11	MDF	40	dupla	1,022 (0,002)	35,14 (1,65)	49,48 (0,63)	5,90 (0,56)	2154,1 (240,2)	38,80 (0,11)
12	Pinus	20	dupla	0,964 (0,003)	23,67 (1,19)	27,31 (0,23)	6,37 (0,51)	1104,7 (97,5)	46,71 (2,77)
13	Pinus	20	mono	0,944 (0,007)	19,32 (0,27)	25,58 (0,58)	6,25 (0,33)	1047,0 (102,5)	47,80 (2,99)
14	Pinus	30	dupla	0,997 (0,003)	24,48 (0,06)	28,94 (14,37)	6,34 (0,23)	1501,6 (98,1)	41,83 (2,07)
15	Pinus	30	mono	0,991 (0,006)	20,14 (0,80)	28,22 (0,39)	5,35 (0,21)	1382,5 (51,2)	45,91 (4,54)
16	Pinus	40	dupla	1,025 (0,002)	31,08 (0,25)	45,52 (1,77)	5,55 (0,28)	1996,5 (331,1)	40,88 (1,42)

NOTA: Valores entre parênteses referem-se ao Desvio-Padrão

TABELA 36 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DE DENSIDADE, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO EXPERIMENTO COM DIFERENTES TIPOS E PROPORÇÕES DE SERRAGEM EM EXTRUSORAS

Fonte de Variação	GL	Quadrado médio		
		Densidade	Resistência à tração	Resistência à flexão
Mistura	16	0,005	98,074	302,143
Resíduo	68	0,000019	0,771	0,452
Coeficiente de Variação (%)		0,45	3,44	1,96

4.4.3.1 Densidade dos compósitos extrusados

A análise de variância da densidade dos compósitos em função das variáveis analisadas é apresentada na Tabela 37. No Anexo 1 pode-se visualizar os testes de Tukey para as médias. Houve influência do tipo de serragem e da proporção de serragem na densidade, além de haver interação dupla entre essas duas variáveis e o tipo de processo usado. Não houve influência significativa do processo e da interação tripla das três variáveis.

TABELA 37 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA OBTIDOS POR INJEÇÃO DAS MISTURAS EXTRUSADAS, PARA OS FATORES ESTUDADOS E INTERAÇÃO ENTRE ELES

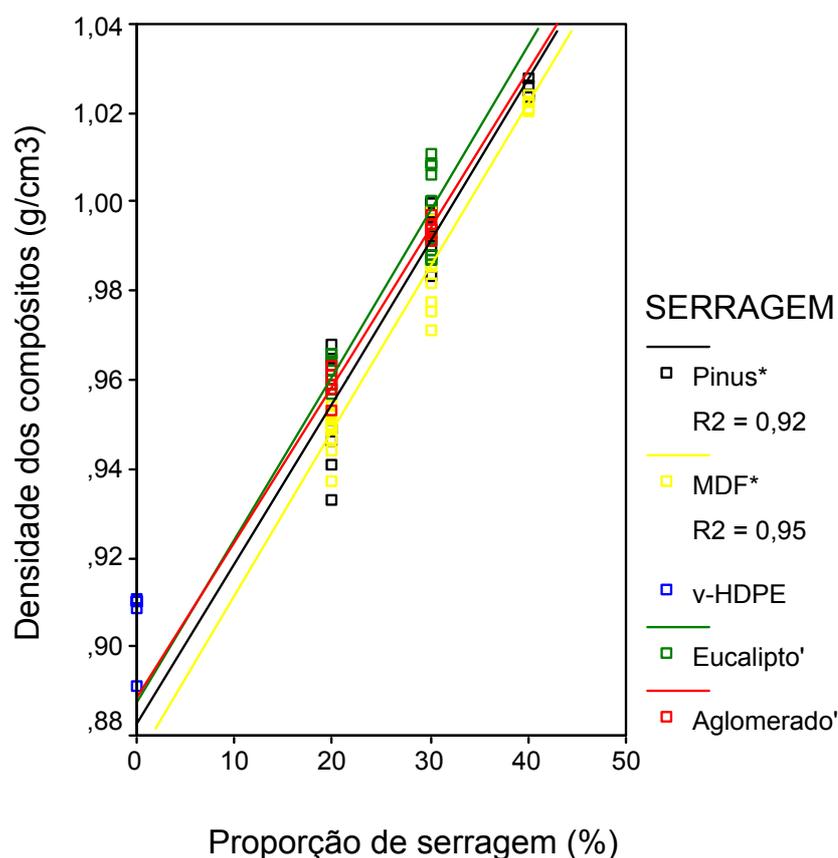
Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F
Tipo de Serragem	,001	3	,000	23,395*
Proporção de Serragem	,040	2	,020	1021,129*
Processo	2,073E-05	1	2,073E-05	1,062
Serragem x Proporção	,001	4	,00025	6,754*
Serragem x Processo	,002	2	,001	41,560*
Proporção x Processo	,001	1	,001	44,916*
Serragem x Proporção x Processo	1,007E-05	2	5,036E-06	,258
Erro	,001	68	1,951E-05	
Total	,078	84		

NOTA: *Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Independente do tipo de processo e do tipo de serragem utilizado, a proporção de serragem foi a variável de maior influência sobre a densidade dos

compósitos. A influência da proporção de serragem na densidade dos compósitos foi também verificada no experimento com misturador tipo Drais (4.3.3.1) e em outros trabalhos como os de YOUNGQUIST (1997) e STARK (1999), ambos trabalhando com polipropileno, e os de YAM (1990) e FONSECA (2005) que trabalharam com misturas de HDPE reciclado e madeira. Em todos os casos, verifica-se que a serragem causa um aumento da densidade dos compósitos em relação ao polímero puro e que um aumento da proporção de serragem no compósito causa um aumento da densidade (Figura 50).

FIGURA 50 - DENSIDADE DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA



NOTAS: ' Linha de tendência

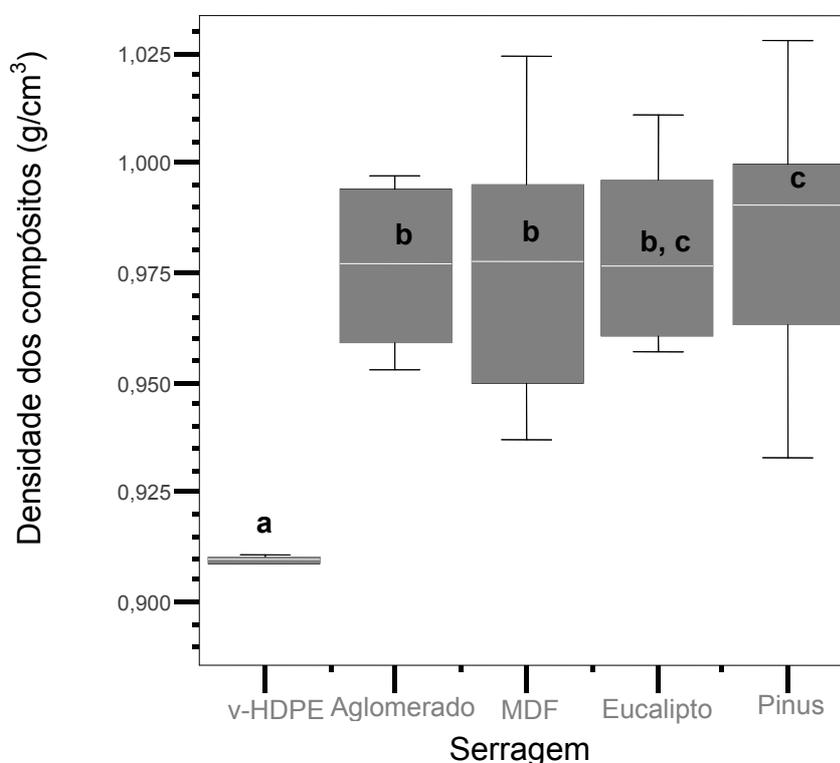
*Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

Por outro lado, foi também verificada uma influência do tipo de serragem usada na densidade dos compósitos e da interação entre o tipo de serragem e a

proporção de serragem. Verifica-se que, para todos os tipos de serragem, as linhas de regressão e as linhas de tendência são quase paralelas, mostrando que a interação entre esses fatores é pequena.

A Figura 51 apresenta a densidade média dos compósitos para cada tipo de serragem e para o v-HDPE puro. Foi verificado, pelo teste de Tukey, que as médias de densidade dos compósitos diferem da média do v-HDPE puro e que a média de densidade para pinus difere dos outros tipos de serragem usados, exceto dos compósitos confeccionados com eucalipto. Os compósitos confeccionados com pinus apresentaram uma densidade média maior que os compósitos confeccionados com serragem de MDF e de aglomerado. Também, o teste de Tukey mostrou que a densidade média dos compósitos confeccionados com aglomerado, MDF e eucalipto, não apresentou diferença significativa.

FIGURA 51 - VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE DOS COMPÓSITOS E AMPLITUDE DE VARIAÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS POR TIPO DE SERRAGEM



NOTA: Médias indicadas por mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro

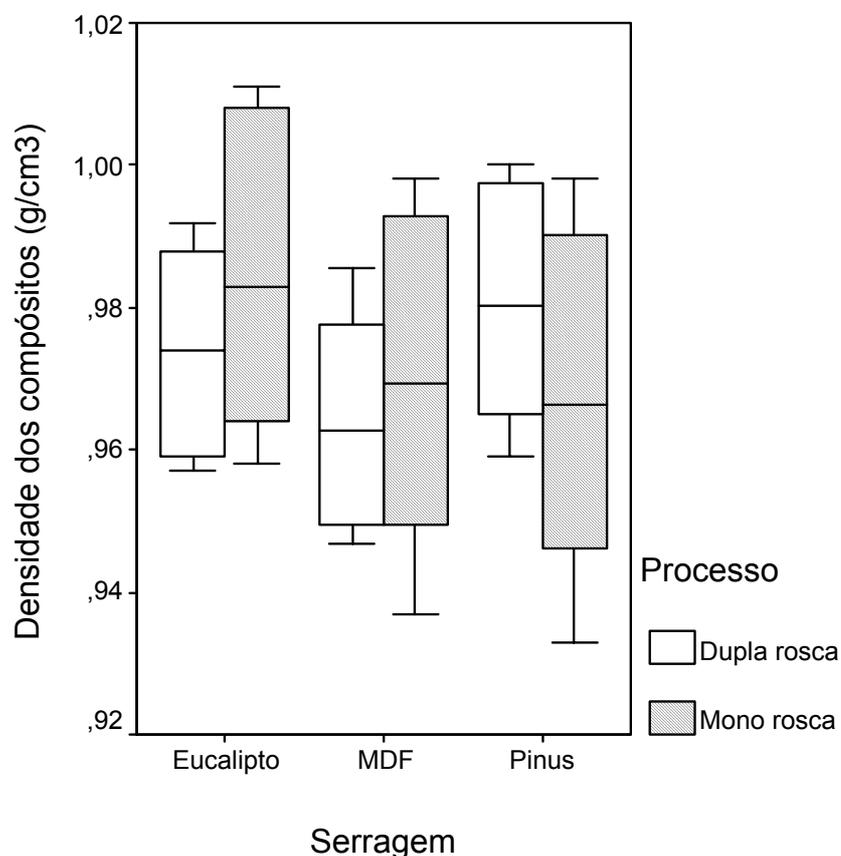
É possível verificar também, na Figura 51, que a amplitude dos valores médios de densidade para o pinus e para o MDF é maior que a amplitude observada para o eucalipto e o aglomerado. Grande parte desse efeito é devido aos compósitos confeccionados com pinus e com MDF terem sido produzidos nas proporções de 20%, 30% e 40%, enquanto os de eucalipto e de aglomerado apenas nas proporções de 20% e 30%. Se observa uma maior amplitude de densidade dos compósitos de eucalipto em relação aos compósitos de aglomerado, embora de pequena magnitude. Nesse caso, deve-se lembrar que os compósitos confeccionados com aglomerado foram produzidos somente no processo de extrusão com extrusora mono-rosca.

Por outro lado, os efeitos observados nas interações “tipo de serragem x processo” e “proporção de serragem x processo” foram marcantes, mostrando que os diferentes tipos de processos usados causaram diferentes efeitos na densidade dos compósitos confeccionados com os diferentes tipos de serragem e com as diferentes proporções de serragem.

Na Figura 52, são apresentados os valores médios de densidade em função do tipo de serragem utilizado, separado por tipo de processo. Nessa análise, foram desconsiderados os valores obtidos para os compósitos confeccionados com aglomerado e com a proporção de 40%, visando uniformizar a análise. Verifica-se que, enquanto para eucalipto e MDF a densidade média no processo de dupla-rosca foi menor que a densidade média no processo com mono-rosca, para pinus ocorreu o contrário.

Aqui, pode-se inferir que existe uma influência da granulometria da serragem desses diferentes materiais, embora não possa ser bem entendida. Sabe-se que o MDF e o eucalipto possuem uma frequência de granulometria com melhor distribuição nas diferentes classes de tamanho que o Pinus, o qual possui uma concentração maior de frequência numa classe de tamanho (4.2.1). Por outro lado, a granulometria da serragem de MDF não pode ser considerada semelhante a do eucalipto, o qual possui, grosso modo, granulometria maior. Fica a suposição de que deva existir também uma influência de outras características, inerentes ao tipo de serragem, na densidade dos compósitos quando submetidos aos diferentes processos usados.

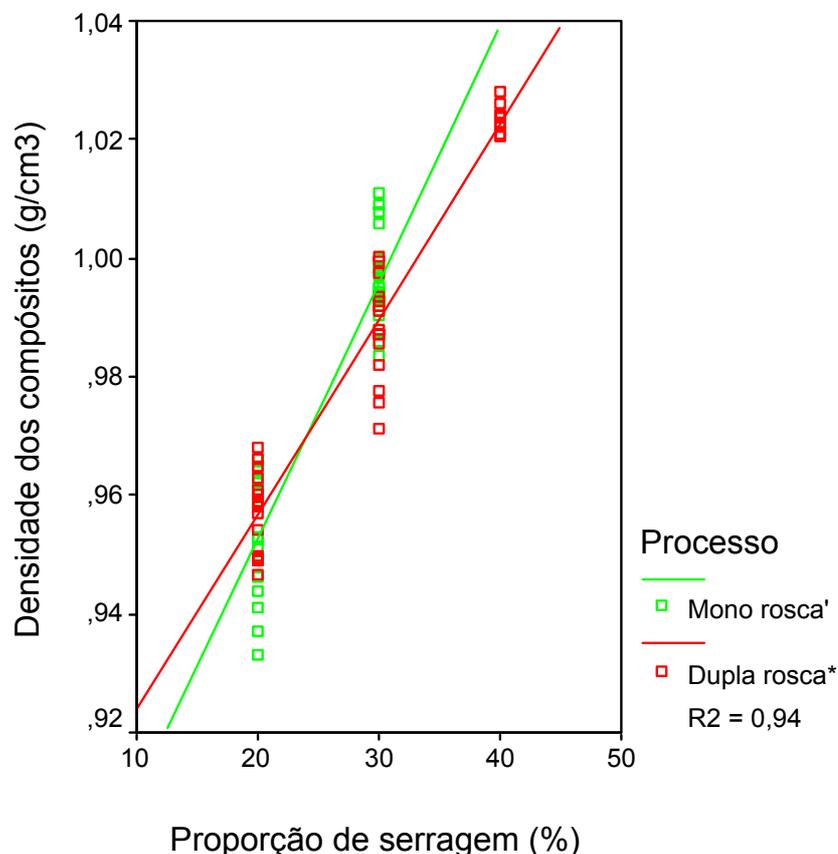
FIGURA 52 - MÉDIA E AMPLITUDE DOS VALORES DE DENSIDADE PARA DIFERENTES TIPOS DE SERRAGEM USADOS, NAS PROPORÇÕES DE 20% E 30%, SEPARADOS POR TIPO DE PROCESSO EMPREGADO



É importante salientar que a amplitude de valores observados no processo com mono-rosca é maior que no processo com dupla-rosca para os três tipos de serragem analisados. Esse fato confirma uma melhor homogeneização da mistura nos compósitos confeccionados em extrusora de dupla-rosca, pois se obteve compósitos mais homogêneos em densidade.

Por fim, na Figura 53 são apresentados os valores de densidade dos compósitos em função da proporção de serragem para cada tipo de processo usado. Verifica-se que um aumento na proporção de serragem causa um aumento maior na densidade dos compósitos confeccionados em extrusora mono-rosca, em relação aos compósitos confeccionados em dupla-rosca.

FIGURA 53 - DENSIDADE DOS COMPÓSITOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO EMPREGADO, INDEPENDENTE DO TIPO DE SERRAGEM



NOTAS: ' Linha de tendência

*Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

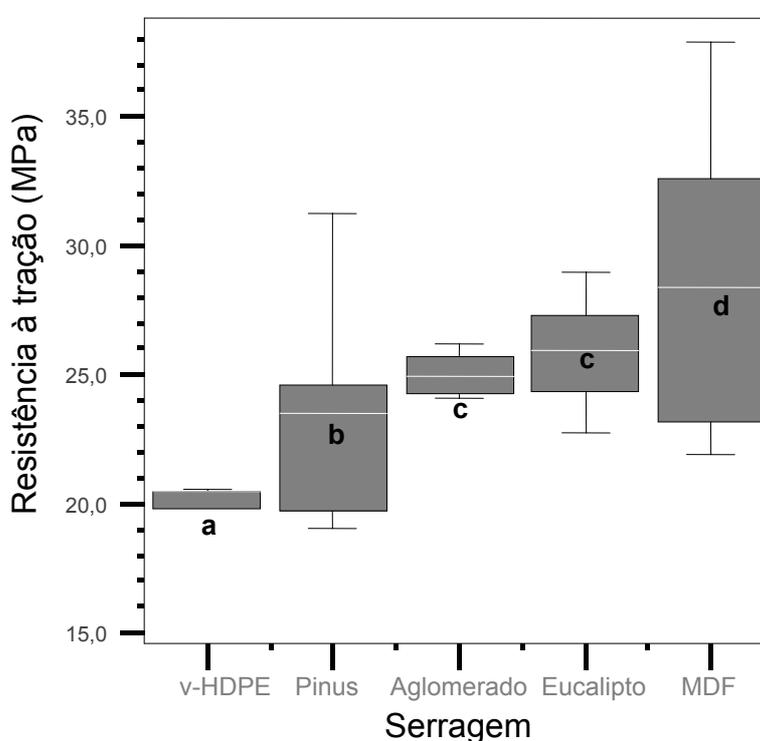
4.4.3.2 Resistência à tração dos compósitos extrusados

A análise de variância da resistência à tração dos compósitos extrusados mostrou que houve influência das três variáveis estudadas e das interações entre variáveis, inclusive da interação tripla. O Anexo 2 apresenta a análise de variância da resistência à tração e os testes de Tukey entre as médias encontradas para os fatores estudados.

A influência do tipo de serragem utilizado é representada na Figura 54. Verifica-se que todas as serragens usadas causaram um aumento na resistência à tração dos compósitos em relação ao v-HDPE puro. Na comparação entre os diferentes tipos de serragem, a de MDF foi a que proporcionou maiores valores de

resistência à tração, seguida da serragem de eucalipto e de aglomerado, que não apresentaram diferença significativa entre as médias encontradas. Os compósitos confeccionados com serragem de pinus foram os que apresentaram os menores valores médios dessa propriedade.

FIGURA 54 - MÉDIAS E AMPLITUDES DE VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS OBSERVADOS POR TIPO DE SERRAGEM



*Médias indicadas por mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro

Diferenças nos valores médios de resistência à tração na força máxima entre compósitos confeccionados com diferentes características de fibras de madeira em misturas com PP foram encontradas por STARK & ROWLANDS (2002). Os autores trabalharam com serragem de diferentes granulometrias e com fibras obtidas de um refinador de disco pressurizado. Embora tenham concluído que a razão de aspecto (coeficiente de esbeltez) e não o tamanho da partícula tenha um grande efeito na resistência dos compósitos, os autores observaram uma diferença nos valores

médios de resistência à tração entre quatro diferentes granulometrias de serragem usadas.

Salienta-se, no entanto, que não foi observada uma relação entre o tamanho da partícula e a resistência à tração, sendo que das granulometrias estudadas, de 35, 70, 120 e 235 MESH, o mais alto valor de resistência à tração foi observado para 70 MESH e o mais baixo para 35 MESH.

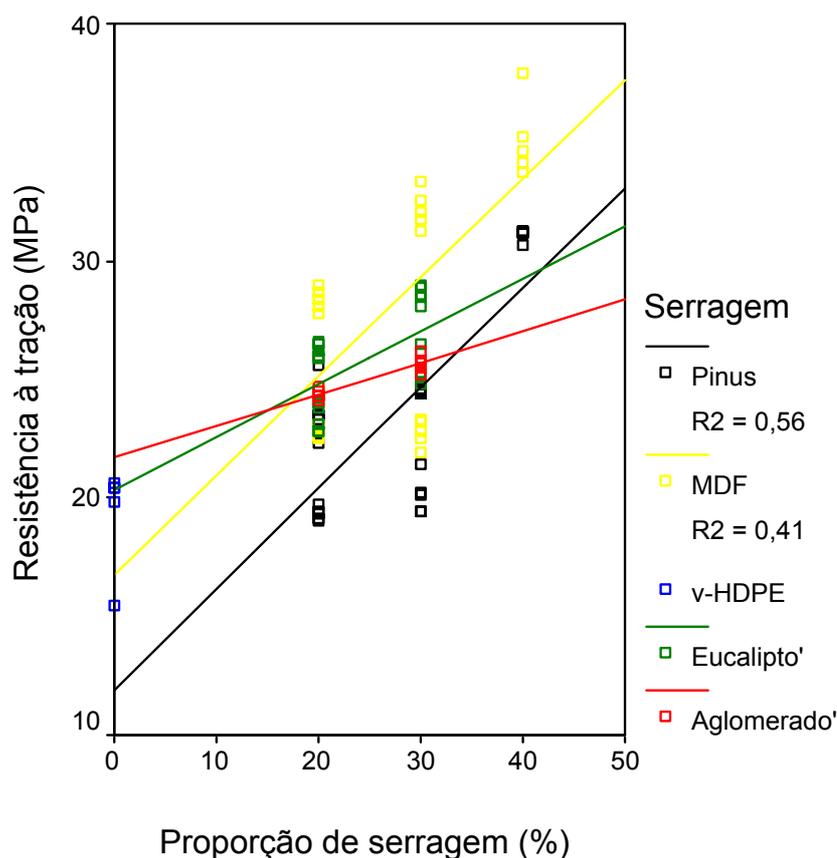
YAMAJI (2004), trabalhando com resíduos de folhosas de uma indústria de compensados para produção de compósitos com polipropileno, verificou que para uma proporção de 30% de madeira houve influência da granulometria do material. O autor utilizou resíduos na forma de serragem de uma esquadrejadeira e na forma de pó de uma lixadeira, observando que o uso de serragem ocasionou maiores valores médios de resistência à tração do que o uso de pó-de-lixia. Por outro lado, para uma proporção de 10% de madeira no compósito, não foi observada diferença entre os valores médios dessa propriedade em relação a granulometria.

Além das diferenças observadas em função da granulometria da serragem ou da razão de aspecto das fibras de madeira usadas em compósitos com termoplásticos, ainda não foram observadas diferenças decorrentes de outras características, inerentes à espécie de madeira utilizada. Nesse trabalho, não pode-se atribuir as diferenças observadas nos valores médios de resistência à tração somente à diferença observada na distribuição granulométrica entre os diferentes tipos de serragem. Em geral, um aumento da granulometria da serragem contribui para um aumento da resistência à tração do compósito até um limite de tamanho em que seja possível de se realizar a mistura. Pela Figura 54, no entanto, se verifica que a maior média de resistência à tração foi obtida para os compósitos confeccionados com serragem de MDF, que é o tipo de serragem que apresenta a menor granulometria, considerando a média de distribuição granulométrica entre os tipos de serragem utilizados.

Na Figura 55, são apresentados os valores observados de resistência à tração em função da proporção de serragem para cada tipo de serragem usada. Verifica-se que o comportamento dessa propriedade em função do aumento da proporção de serragem foi semelhante para a serragem de pinus e de MDF, sendo diferente dessas em relação à serragem de eucalipto e de aglomerado. Em todos os

casos, todavia, um aumento da proporção de serragem causa um aumento da resistência à tração.

FIGURA 55 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPOSTOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA



NOTAS: ' Linha de tendência

*Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

Os estudos que consideraram os efeitos da proporção de serragem na resistência à tração de compostos de madeira com matrizes termoplásticas, apresentam resultados controversos. ROBIN & BRETON (2001) não encontraram uma relação entre a proporção de serragem de *Picea* sp. e a resistência à tração de compostos com HDPE, a qual se verificou com valor máximo a 10% de proporção de serragem. Acima desse percentual, a resistência à tração diminuiu com o aumento da proporção de serragem.

YAMAJI (2004) observou que o aumento da proporção de madeira, de 10% para 30%, em compósitos com PP, provocou uma diminuição da resistência à tração, tanto para compósitos confeccionados com serragem como para aqueles confeccionados com pó-de-lixia. Esse desempenho inferior dos compósitos com maior conteúdo de madeira foi atribuído a maior dificuldade em se obter uma mistura homogênea, nas condições experimentais daquele trabalho. O autor observou também, que a dispersão do pó-de-lixia foi ainda mais difícil que a da serragem, resultando na formação de agregados que causaram o enfraquecimento da adesão fibra-matriz.

No experimento com misturador tipo Drais, não foi verificada influência da proporção de serragem na resistência à tração dos compósitos (4.3.3.2). Esse fato foi atribuído à porosidade das placas, decorrentes da formação de bolhas durante a prensagem. Ao contrário, os compósitos misturados por extrusão e confeccionados por injeção mostram que existe uma relação entre a proporção de serragem e a resistência à tração (Tabela 34), que é diretamente proporcional, independente do tipo de serragem usado.

Segundo CORREA et al. (2003), as propriedades mecânicas dos compósitos termoplásticos reforçados com farinha de madeira tendem a ser inferiores às da madeira in natura. Por outro lado, ganhos com a adição de madeira em compósitos, em relação às matrizes termoplásticas puras, são significativos.

A resistência à tração pode também explicitar como ocorre a adesão entre as fases de fibra e matriz. Num sistema ideal, se desejaria obter uma força de adesão entre as fases maior que a força de coesão entre as moléculas da fase que possui melhor propriedade. A resistência à tração para madeira, contudo, depende de vários fatores inerentes às características de um material anisotrópico. Além disso, no caso da serragem, não se refere à resistência das fibras individuais da madeira, mas sim da resistência de um agregado, formado por fibras e por outros tipos celulares.

São por essas razões que os trabalhos que analisam as propriedades de tração, de compósitos com HDPE, ou PP, e madeira, encontram relações entre a proporção de madeira e o MOE ou o alongamento, e não em relação à resistência à tração na força máxima ou a resistência à tração na ruptura. Essas últimas sofrem

influência marcante da dispersão da madeira na matriz polimérica e da adesão entre as fases.

Prever a resistência à tração para esses compósitos com base na regra das misturas e comparar o modelo teórico com os resultados obtidos nos ensaios, seria uma forma de verificar a qualidade de adesão. No entanto, embora seja fácil determinar essa propriedade para o HDPE, torna-se difícil determiná-la para a serragem.

VIANNA et al. (2004) utilizaram a regra das misturas para compósitos, reforçados com fibras descontínuas e aleatoriamente orientadas (fibras curtas), e desenvolveram um modelo teórico de estimativa do MOE em função da proporção de farinha de madeira, em compósitos com poliestireno de alto impacto (HIPS). Os autores compararam o modelo teórico com os resultados obtidos em ensaios de tração, no entanto, utilizaram como parâmetro da fase de fibras os dados médios obtidos de MOE em compressão paralela às fibras para *Pinus caribea*.

No processamento dos compósitos em extrusora, tanto mono-rosca como dupla-rosca, existe uma certa orientação das partículas de madeira utilizadas. No entanto, não se sabe a proporção em que ocorre essa orientação e de que forma as fibras estão orientadas em relação às partículas. Dessa forma, torna-se difícil prever qual a resistência da fase de fibras.

As propriedades de resistência à tração para madeiras, e também para seus derivados, variam em função do tipo de madeira e da orientação das fibras ou do plano da chapa. SANTINI et al. (2000) apresentam resultados médios de MOE em compressão paralela às fibras para *Pinus taeda* de 8591 MPa, enquanto os resultados médios para MOE em compressão normal às fibras foram da ordem de 290 MPa. KOLLMANN et al. (1975) mostram que os valores de resistência à tração paralela ao plano de chapas aglomeradas, se situam normalmente entre 4,9 e 29 Mpa, enquanto os valores dessa propriedade normal ao plano da chapa dão resultados próximos a 0,44 MPa. Além disso, deve-se considerar a compressão que sofrem as partículas de madeira durante o processamento dos compósitos e que diminuem a porosidade da madeira (4.4.3.1).

Em vista dessas considerações e dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a resistência à tração dos compósitos deve aumentar com o aumento da

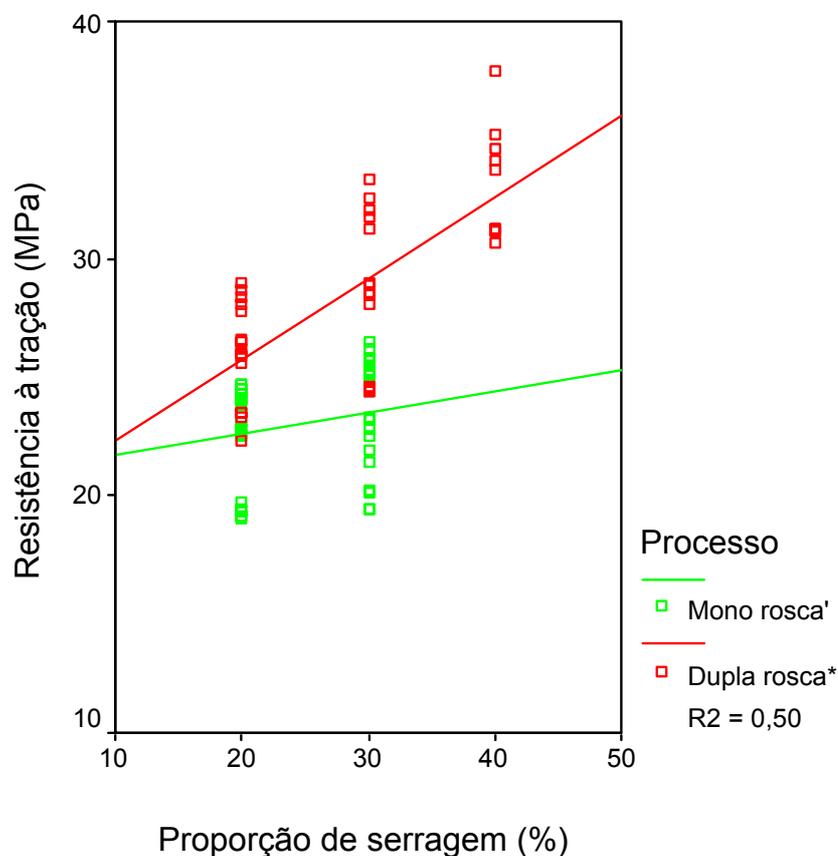
proporção de serragem nos compósitos, conforme foi verificado. Essa relação só irá ocorrer se houver uma boa dispersão da serragem na matriz polimérica e se houver uma boa adesão entre as fases, ou seja, se a força de adesão for superior a força de coesão da matriz.

Como para todos os tipos de serragem foi encontrada essa relação, observando-se a Figura 55 pode-se inferir que houve melhor dispersão e melhor adesão entre as fases para a serragem de MDF e de pinus. O fato dos compósitos de serragem de pinus ter valores médios de resistência à tração inferiores aos demais está relacionado ao fato da madeira dessa espécie apresentar propriedades mecânicas inferiores. Para aglomerado e eucalipto, o fato de um aumento da proporção de madeira provocar menor aumento proporcional do que para pinus e MDF, indica que a adesão foi inferior, sendo melhor nos compósitos confeccionados com eucalipto do que com aglomerado.

Em relação ao processo, foi observado que os compósitos produzidos em extrusora dupla-rosca apresentaram melhores resultados de resistência à tração que os resultados obtidos para os compósitos produzidos em mono-rosca. A Figura 56 apresenta esses resultados em função da proporção de serragem, separados por tipo de processo empregado. Esses resultados eram esperados e confirmam que o processamento, em extrusora dupla-rosca, proporciona uma melhor dispersão na matriz polimérica, a qual se reflete na propriedade de resistência à tração.

A influência do tipo de processo empregado na resistência à tração, para cada tipo de serragem usada é ilustrada na Figura 57. Verifica-se que para os três tipos de serragem em que foram usados os dois tipos de extrusoras, os valores de resistência à tração foram maiores para os compósitos processados em dupla-rosca. Também é possível visualizar a interação que ocorre entre o tipo de processo e o tipo de serragem usada. Enquanto para o processo de dupla-rosca a maior média foi para os compósitos produzidos com eucalipto, seguido do MDF e do pinus, respectivamente, para o processo com mono-rosca a maior média foi para o MDF, seguida do eucalipto e do pinus.

FIGURA 56 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO EMPREGADO

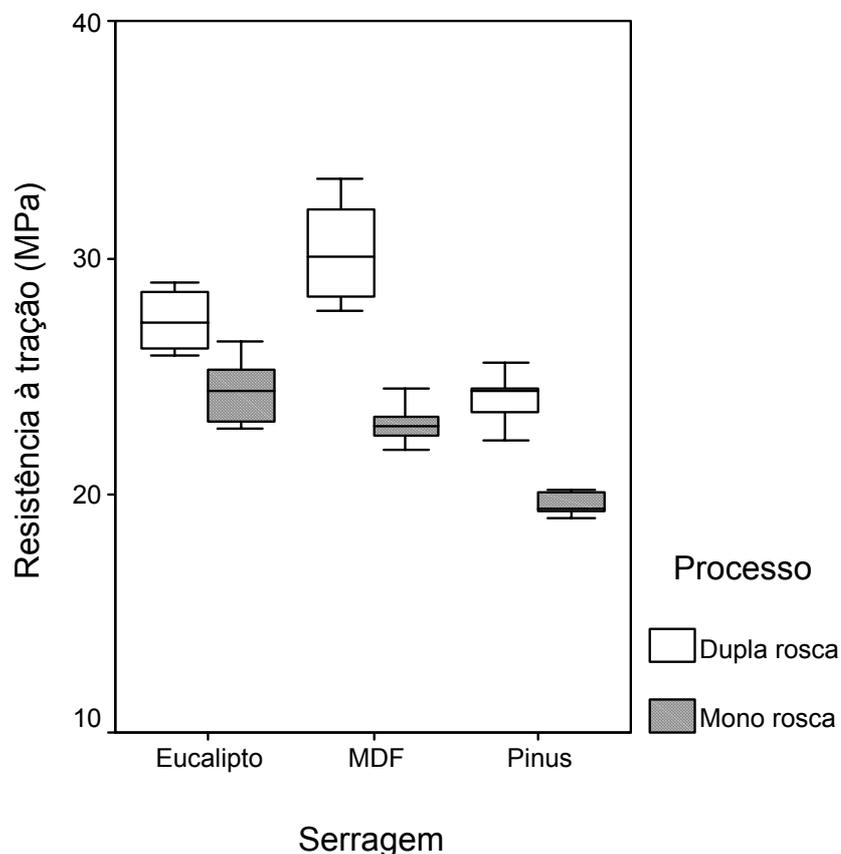


NOTAS: ' Linha de tendência

*Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

Numa análise geral dos resultados de resistência à tração, verificou-se que houve influência de todos os fatores estudados e todas as interações entre eles. O tipo de serragem que apresentou os melhores resultados foi o MDF, quando produzido na extrusora de rosca-dupla e para a proporção de 40%. Para essa mistura o valor médio de resistência à tração foi de 35,14 MPa. O valor médio mais baixo foi da ordem de 19,32 MPa, obtido para os compósitos produzidos com pinus na proporção de 20%, em extrusora mono-rosca. Esse valor foi ligeiramente inferior ao valor da resistência à tração do v-HDPE, de 19,36 MPa, mas não diferiu estatisticamente do mesmo. Dessa forma, todos os compósitos produzidos apresentaram valores de resistência à tração iguais ou superiores ao v-HDPE puro, confirmando que todos os tipos de serragem usados não causam a diminuição dessa propriedade.

FIGURA 57 - MÉDIAS E AMPLITUDES DE VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS POR TIPO DE SERRAGEM E PROCESSO EMPREGADO PARA 20 E 30% DE EUCALIPTO, MDF E PINUS



A maior influência do tipo de processo empregado foi verificado para a serragem de MDF processada em extrusora de dupla-rosca, pois a diferença do valor médio de resistência à tração do MDF processado nesse tipo de extrusora em relação aos compósitos processados em mono-rosca foi superior à diferença verificada para a serragem de pinus e de eucalipto.

Individualmente, o fator de maior influência na resistência à tração dos compósitos foi o processo empregado, seguido da proporção de serragem e do tipo de serragem, respectivamente. Esse fato confirma a tese de que o controle dessas variáveis é fundamental para homogeneidade do produto final.

4.4.3.4 Resistência à flexão dos compósitos extrusados

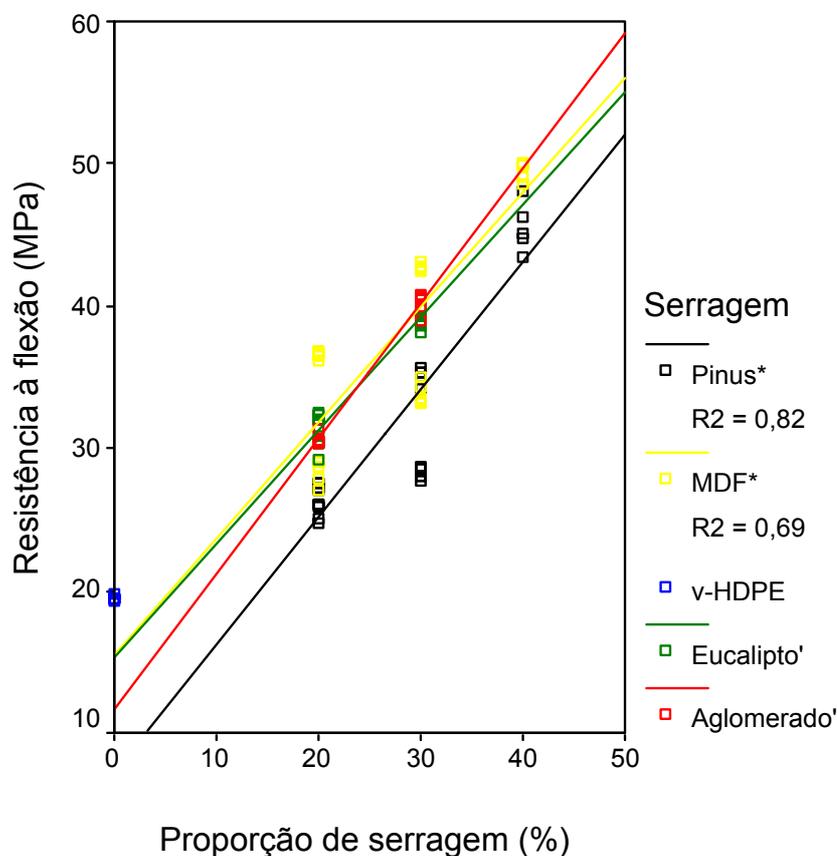
A resistência à flexão apresentou correlação significativa com todas as outras variáveis analisadas, em especial com a resistência à tração, a proporção de serragem e a densidade dos compósitos (Tabela 34 - seção 4.4.3). A análise de variância (Anexo 3) mostrou que houve influência das três variáveis estudadas e das interações entre elas.

O teste de Tukey realizado para cada um dos fatores principais (Anexo 3), mostrou que a serragem de MDF apresentou os valores médios mais altos para essa propriedade, com média de 38,2 MPa. A serragem de pinus apresentou a média mais baixa de resistência à flexão, com média de 32,4 MPa, enquanto as serragens de eucalipto e de aglomerado apresentaram valores intermediários de 35,2 MPa e 35,4 MPa, respectivamente. Todos os compósitos, no entanto, apresentaram valores médios superiores ao HDPE puro, que teve como média 19,4 MPa, independente do processo e da proporção de serragem usada.

A Figura 58 apresenta a resistência à flexão dos compósitos extrusados em função da proporção de serragem para cada tipo de serragem usada. Verifica-se que interação entre tipo de serragem e proporção de serragem é pequena e que a serragem de pinus apresenta os menores valores de resistência à flexão para as diferentes proporções testadas.

A influência da proporção de madeira na resistência à flexão em compósitos com termoplásticos foi verificada por alguns autores como ROBIN & BRETON (2001), HWANG et al (1999) e FONSECA (2005). Nesses trabalhos, os autores verificaram que a resistência à flexão aumenta com o aumento do teor de madeira no compósito. Em geral, deve haver uma boa adesão entre as fases de fibra e de matriz para que isso ocorra, mas mesmo num sistema de baixa adesão se verifica esse comportamento. No trabalho de FONSECA (2005), o autor considerou que houve fraca adesão entre as fases de fibra e de matriz. Essa afirmação foi confirmada pelo fato da resistência à tração dos compósitos diminuir com o aumento da proporção de serragem.

FIGURA 58 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA



NOTAS: ' Linha de tendência

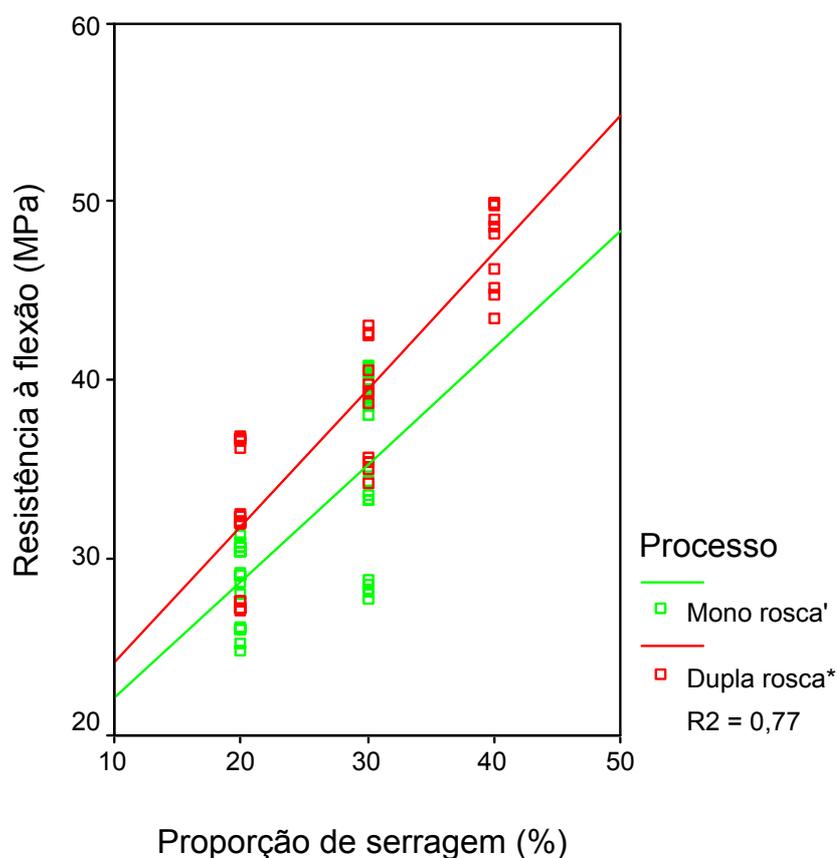
*Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

No experimento com misturador tipo Drais (4.3.3.3), não foi verificada influência da proporção de serragem na resistência à flexão dos compósitos. Por outro lado, foi verificada influência do tipo de serragem e da interação entre “proporção x tipo de serragem”. O fato de não se encontrar uma relação entre a resistência à flexão e a proporção de serragem naquele experimento também foi atribuída à porosidade das placas provocada pela formação de bolhas no momento da prensagem.

Nesse experimento, essa relação foi encontrada independente do tipo de serragem e do tipo de extrusora utilizados. Embora a análise de variância tenha demonstrado que existe interação entre essas duas variáveis e a proporção de serragem, para todas as serragens usadas, um aumento da sua proporção causa um aumento da resistência à flexão.

A análise do comportamento da resistência à flexão em função da proporção de serragem, para cada tipo de processo usado, é ilustrado na Figura 59. Da mesma forma que para cada tipo de serragem usada, um aumento da proporção de serragem causa um aumento da resistência à flexão, tanto para extrusora mono-rosca como para extrusora dupla-rosca. Por outro lado, se verifica pela regressão ajustada, que os compósitos confeccionados com dupla-rosca apresentaram valores de resistência à flexão ligeiramente superiores aos apresentados pelos compósitos confeccionados com mono-rosca. Além disso, a comparação entre a linha de regressão da dupla-rosca e a linha de tendência da mono-rosca mostra que aquele processo tem melhor efeito na resistência à flexão do que esse, quando se adiciona maior proporção de serragem no compósito.

FIGURA 59 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO EMPREGADO

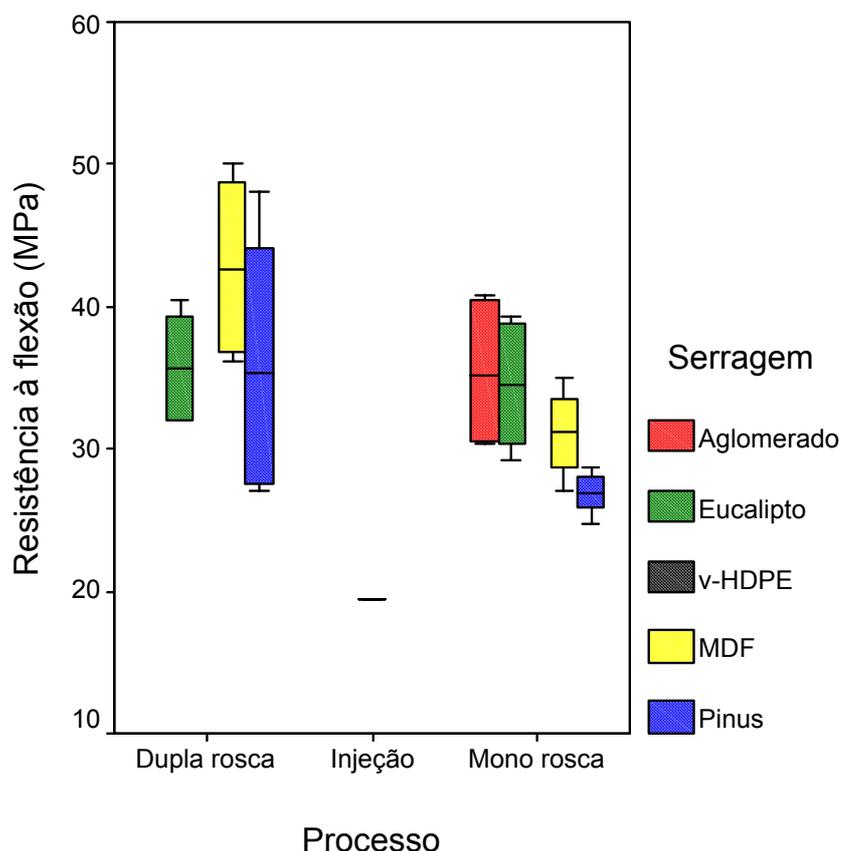


NOTAS: ¹ Linha de tendência

*Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A Figura 60 apresenta os valores de resistência à flexão dos compósitos para cada tipo de processo, separados por serragem utilizada. Enquanto na extrusora dupla-rosca a serragem de MDF apresentou a média mais alta de valores de resistência à flexão, seguida do eucalipto e do pinus, respectivamente, na extrusão com mono-rosca, a serragem de eucalipto apresentou a média mais alta, seguida do MDF e do pinus, respectivamente. É importante ressaltar que na extrusão com mono-rosca a serragem de aglomerado apresentou valores médios de resistência à flexão superiores a todos os outros tipos de serragem.

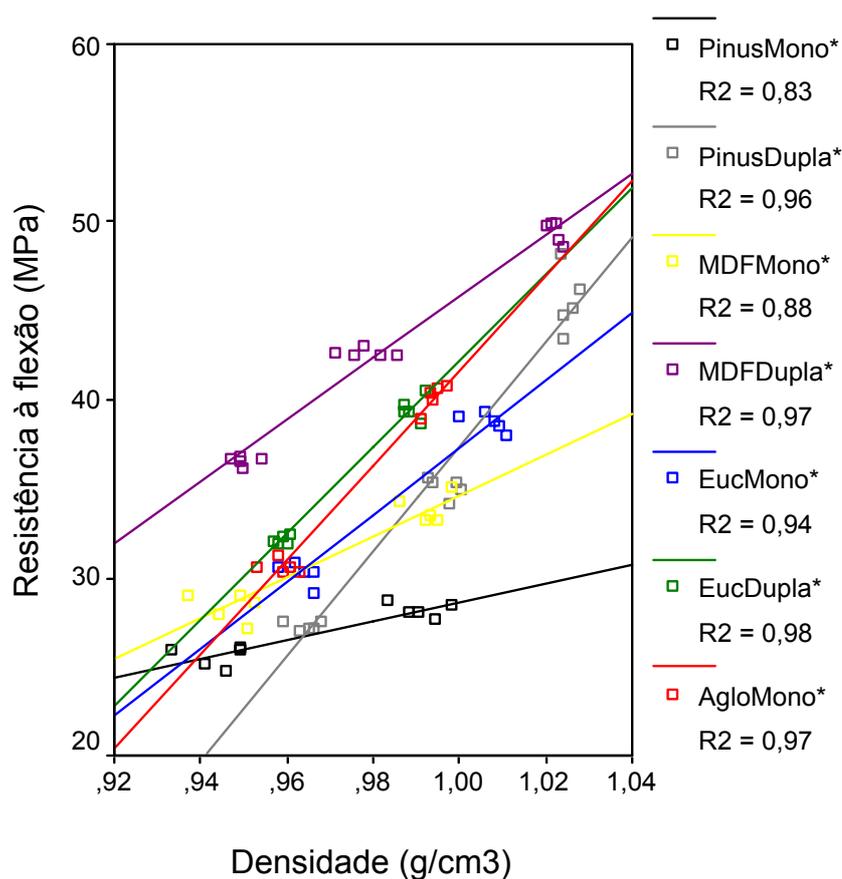
FIGURA 60 - MÉDIAS E AMPLITUDES DE VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS POR TIPO DE PROCESSO E SERRAGEM USADOS



Numa análise da resistência à flexão em função da densidade, verifica-se que mantendo as outras variáveis independentes constantes, existe uma melhor correlação entre esses fatores. Esse fato é ilustrado na Figura 61, onde são apresentados os valores de resistência à flexão em função da densidade, separados

por tipo de serragem e tipo de processo usado. Nesse gráfico, é possível verificar que o coeficiente de determinação das linhas de regressão ajustadas para cada grupo de compósitos é superior a 0,83. Como existe correlação significativa entre a densidade dos compósitos e a proporção de serragem, pode-se dizer que um aumento dessa proporção causa um aumento da resistência à flexão. Essa relação tem um comportamento diretamente proporcional e linear quando se mantêm os outros fatores constantes, mostrando que é possível estimar a resistência à flexão em função da densidade dos compósitos ou da proporção de serragem com boa precisão.

FIGURA 61 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA DENSIDADE, SEPARADOS POR TIPO DE SERRAGEM E PROCESSO

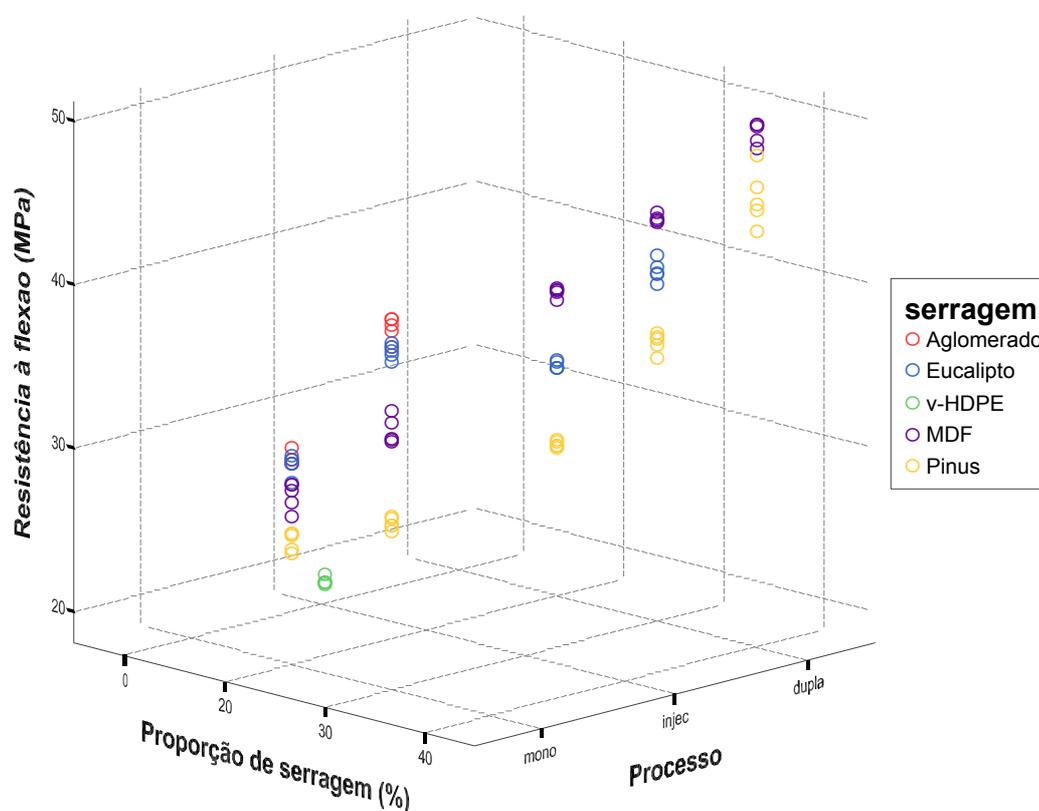


NOTA: *Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Por fim, a interação entre as três variáveis independentes analisadas pode ser visualizada na Figura 62. Verifica-se que a serragem de MDF, na proporção de 40% e extrusada em dupla-rosca, apresentou os maiores valores de resistência à flexão. Por outro lado, os valores mais baixos de resistência à flexão foram observados para a serragem de pinus, na proporção de 20% e extrusada em mono-rosca.

De uma maneira geral, na extrusão com mono-rosca a serragem de aglomerado foi a que apresentou os melhores resultados de resistência à flexão, seguida das serragens de eucalipto, MDF e pinus, respectivamente. Na extrusão com dupla-rosca a serragem de MDF apresentou os melhores resultados, seguida das serragens de eucalipto e de pinus, respectivamente.

FIGURA 62 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM E DO PROCESSO EMPREGADO PARA CADA TIPO DE SERRAGEM USADA NOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS



4.4.3.5 Alongamento à flexão dos compósitos extrusados

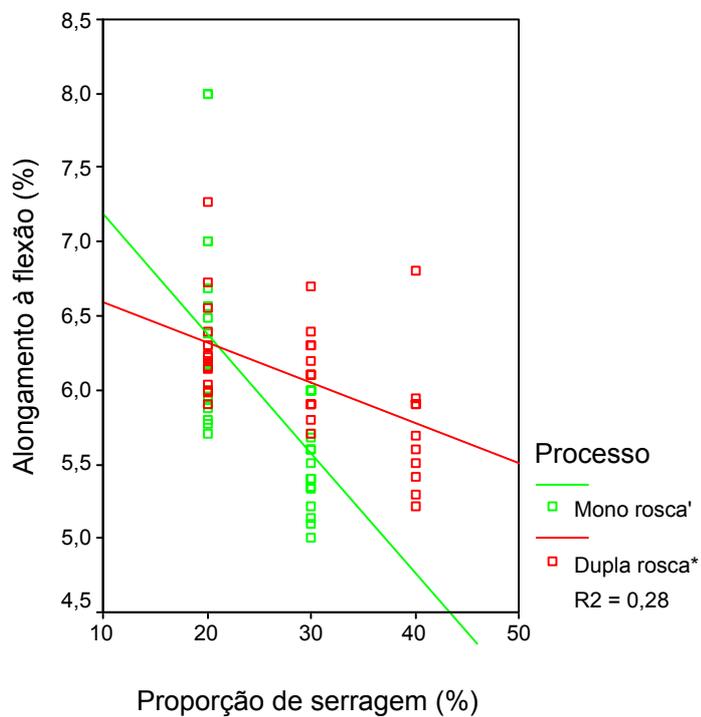
Foi verificada influência da proporção de serragem e da interação “tipo de serragem x processo” e “proporção de serragem x processo” no alongamento à flexão dos compósitos extrusados (Anexo 4). Na medida em que aumenta a proporção de serragem, diminui o alongamento à flexão, independente do tipo de serragem e do processo usado.

A influência da proporção de serragem no alongamento à flexão foi também verificada no experimento com misturador tipo Drais (seção 4.3.3.3) e por outros autores como por ROBIN & BRETON (2001) e BALASURIYA & MAI (2001). Esses últimos também verificaram que o comportamento dessa propriedade em relação à proporção de madeira usada foi diferente, dependendo do tipo de processo empregado. Os autores realizaram as misturas com extrusora dupla-rosca ou misturador rotacional. Por outro lado, também não foi verificada influência do tipo de serragem no alongamento à flexão, no experimento com misturador tipo Drais.

A Figura 63 apresenta o alongamento à flexão dos compósitos em função da proporção de serragem, para cada tipo de processo usado, enquanto a Figura 64 apresenta essa propriedade em função do processo para cada proporção de serragem. Nota-se que o alongamento sofre uma maior influência da proporção de serragem na extrusão com mono-rosca. Esse fato pode ser atribuído a melhor homogeneização obtida no processo com dupla-rosca, que proporciona compósitos menos rígidos e menos quebradiços. Assim, embora não se tenha observado diferença significativa entre as médias de alongamento à flexão dos compósitos confeccionados com os diferentes processos, a interação “proporção x processo” mostra que existe influência desse último quando se considera cada proporção separadamente.

Na análise da Figura 64 verifica-se que, enquanto para extrusão com dupla-rosca o MDF apresentou os valores mais baixos de alongamento à flexão, seguido do eucalipto e do pinus respectivamente, na extrusão com mono-rosca o eucalipto apresentou os menores valores médios, seguido do pinus e do MDF, respectivamente.

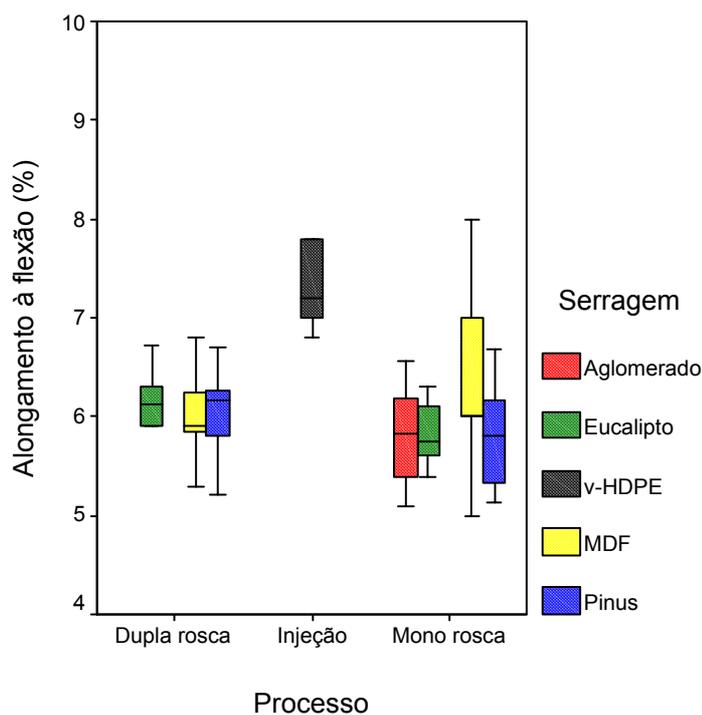
FIGURA 63 - ALONGAMENTO À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE PROCESSO USADO



NOTAS: ' Linha de tendência

*Regressão significativa pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade de erro

FIGURA 64 - MÉDIA E AMPLITUDE VALORES DE ALONGAMENTO À FLEXÃO DOS COMPÓSTOS EXTRUSADOS POR TIPO DE PROCESSO E SERRAGEM USADOS



4.4.3.6 MOE à flexão dos compósitos extrusados

A análise de variância do MOE à flexão dos compósitos extrusados (Anexo 5), mostrou que houve influência das três variáveis estudadas e da interação “tipo de serragem x proporção de serragem”. De forma inversa ao alongamento, na medida que aumenta a proporção de serragem, aumenta o MOE à flexão, no entanto, a influência da proporção de serragem é sentida com mais intensidade no MOE que no alongamento. Esse fato ocorre também quando se considera o tipo de processo usado e o tipo de serragem, ou melhor, quando se compara o MOE do v-HDPE puro com o MOE dos compósitos, seja qual for o tipo de serragem usado. Isso mostra que o MOE melhor expressa a influência dessas variáveis nas propriedades de rigidez dos compósitos.

De fato, a rigidez de compósitos de termoplásticos com madeira foi determinada por alguns autores por meio do MOE à flexão. SAIN et al (2005), trabalhando com fibras de *Hemp (Cannabis sp)*. e fibras obtidas por processo Kraft em compósitos com PP, verificaram que os compósitos com fibra de *hemp* apresentaram maior MOE à flexão que os compósitos com fibras de processo Kraft. Em ambos os casos, no entanto, os valores médios foram inferiores ao MOE obtido com compósitos de PP e fibras de vidro.

WOLCOTT (2003), trabalhando com wood plastic composites (WPC) a partir de resíduos de madeira de *Loblolly pine* e *Douglas fir*, verificou que o MOE dos compósitos com *Loblolly pine* foi significativamente maior que os de *Douglas fir*. O autor salienta que apesar do MOE e da densidade de ambas as madeiras serradas dessas espécies serem idênticos, o MOE dos compósitos de madeira de *Loblolly pine* foi 78% maior que o MOE dos compósitos de *Douglas fir*. Essa diferença foi atribuída à diferente interação entre madeira e plástico nos compósitos. Dessa forma, os resultados sugerem que a espécie de madeira deve ter uma influência significativa na estrutura do material e, em conseqüência, nas suas propriedades.

Nesse trabalho, observando o teste de Tukey do Anexo 5 para a variável tipo de serragem, verifica-se que não houve diferença de MOE entre os quatro tipos de serragem usadas. No entanto, foi verificada diferença entre todas as proporções e entre os dois tipos de processos usados. O aumento do MOE com o aumento da

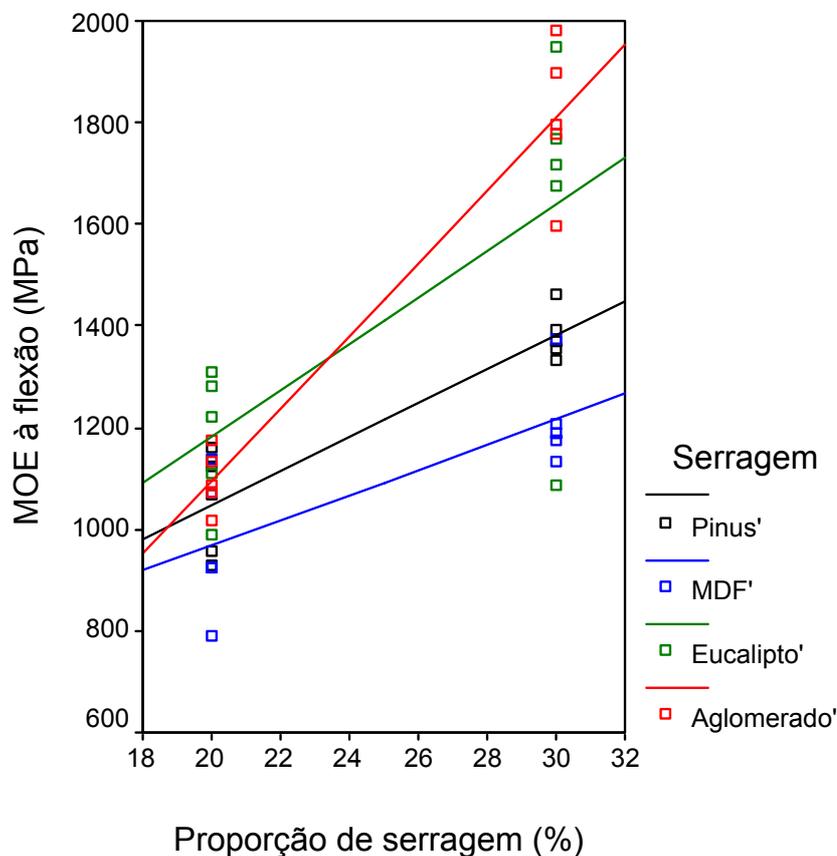
proporção de serragem, ou de fibras, em compósitos de poliolefinas com madeira foi verificado por diversos autores como ROBIN & BRETON (2001), STARK & ROWLANDS (2002), CARASCHI & LEÃO (2002), STARK (1999), entre outros.

O fato de não haver diferença significativa no teste de Tukey entre os tipos de serragem usadas deve-se, em parte, à interação dessa variável com a proporção de serragem e ao fato de se analisar um desenho experimental incompleto. Dessa forma, visando verificar a influência do tipo de serragem no MOE dos compósitos realizou-se a análise de variância dessa variável considerando apenas o processo em mono-rosca para os quatro tipos de serragem. No Anexo 6, é possível observar que a serragem de MDF e a de pinus foram significativamente inferiores às serragens de eucalipto e de aglomerado, mostrando que, da mesma forma que no trabalho de WOLCOTT (2003), a espécie de madeira deve ter uma influência significativa na estrutura do material e, em consequência, nas suas propriedades.

Além da espécie de madeira, um dos fatores que pode ter influenciado no MOE à flexão refere-se a granulometria das diferentes serragens usadas. Em termos gerais, a serragem de MDF e a de pinus apresentaram uma granulometria média inferior à serragem de eucalipto e de aglomerado. Esse fato pode ter contribuído para maior nucleação do polímero naqueles tipos de serragem em relação a esses, contribuindo para que com eucalipto e com aglomerado a mistura se efetue de forma mais homogênea. Para confirmação dessa influência sugere-se a instalação de um experimento para comparar compósitos de serragem de mesma espécie, mas com diferentes granulometrias.

A interação entre proporção de serragem e tipo de serragem observada na análise de variância do Anexo 6, é ilustrada na Figura 65, onde se observa o comportamento do MOE de cada tipo de serragem em relação à proporção de serragem. Se observa que eucalipto e aglomerado dão melhores respostas que pinus e MDF, sendo a diferença entre os MOE dessas espécies sentida com mais intensidade na proporção de 30% de serragem.

FIGURA 65 - MOE À FLEXÃO DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM PARA CADA TIPO DE SERRAGEM UTILIZADA CONSIDERANDO APENAS O PROCESSO COM MONO ROSCA



NOTA: ' Linha de tendência

Por fim, verifica-se também que o processo de mistura em extrusora dupla-rosca proporcionou maiores médias de MOE à flexão que o processo em mono-rosca. Novamente nesse caso se confirma que a extrusão em dupla-rosca proporciona melhor homogeneização da mistura, que se reflete nas propriedades mecânicas dos compósitos.

4.4.3.7 Resistência ao impacto dos compósitos extrusados

No Anexo 7 é apresentada a análise de variância da resistência ao impacto dos compósitos. Verifica-se influência do tipo de serragem, da proporção de serragem e das interações “tipo de serragem x proporção de serragem” e “tipo de

serragem x processo”. A incorporação de serragem causa uma diminuição da resistência ao impacto em relação ao HDPE puro e um aumento da sua proporção no compósito diminui ainda mais essa resistência.

Alguns autores verificaram que o aumento da proporção de serragem no compósito causa a diminuição de sua resistência ao impacto. ROBIN & BRETON (2001) associaram esse comportamento com o menor alongamento à flexão encontrado para os compósitos confeccionados com maior proporção de madeira. Neste trabalho, no entanto, a resistência ao impacto não apresentou correlação significativa com o alongamento à flexão (Tabela 34), mostrando que essas propriedades se comportaram de maneira diferente em relação às variáveis estudadas.

A resistência ao impacto dos compósitos confeccionados com misturador tipo Drais não apresentou diferença significativa em relação ao tipo de serragem usada e à proporção de serragem (seção 4.3.3.4). Também em outros trabalhos como de SELKE & WICHMAN (2004) e BALASURIYA et al. (2001) foram encontrados resultados diversos quando se analisa a resistência ao impacto dos compósitos em função da proporção de serragem. Esses últimos verificaram que a resistência ao impacto de compósitos confeccionados com HDPE de baixo índice de fluidez (LMFI) extrusados, e de baixo e médio índice de fluidez (LMFI, MMFI) processados em misturador rotacional, diminuiu com o aumento da proporção de serragem. Por outro lado, a resistência ao impacto de compósitos extrusados com MMFI - HDPE aumenta até um máximo de 40% de madeira no compósito, quando decresce rapidamente com um maior incremento da proporção de madeira.

Os autores atribuíram esse diferente comportamento dos compósitos confeccionados com HDPE - MMFI e extrusados, a uma melhor distribuição e molhamento das partículas de madeira obtidas pela combinação do processo de extrusão e do índice de fluidez do HDPE. Ainda, é comentado que nesse caso houve melhor penetração do PE, também responsável por esse incremento em resistência ao impacto. Segundo afirmação dos autores, todos os compósitos confeccionados com LMFI extrusados e os compósitos processados em misturador rotacional, apresentaram típicas faces de fratura não homogêneas, com fraca adesão interfacial. De outra forma, os compósitos de MMFI extrusados, com até 50% de

proporção de madeira, apresentaram faces de fratura típicas no HDPE, em áreas concentradas do polietileno. Tendo em vista que o WPC é um compósito não homogêneo, a fase de matriz nesses compósitos formou uma estrutura em rede contínua, resultando em boa distribuição das partículas e bom molhamento.

Com relação ao tipo de serragem, verificou-se que os compósitos apresentaram diferente comportamento de resistência ao impacto. A serragem de MDF apresentou os menores valores médios, seguida do pinus, aglomerado e eucalipto, respectivamente. Com base nas afirmações de BALASURIYA et al. (2001), pode-se inferir que houve melhor distribuição e molhamento das partículas de eucalipto, seguida do aglomerado, pinus e MDF. No entanto, na análise por MEV (Figura 48 e Figura 49 - seção 4.4.2), foi observado que os compósitos confeccionados com pinus e MDF apresentaram melhor distribuição das fibras de madeira no HDPE, enquanto os compósitos confeccionados com eucalipto e com aglomerado apresentaram agregados de fibras em determinadas regiões.

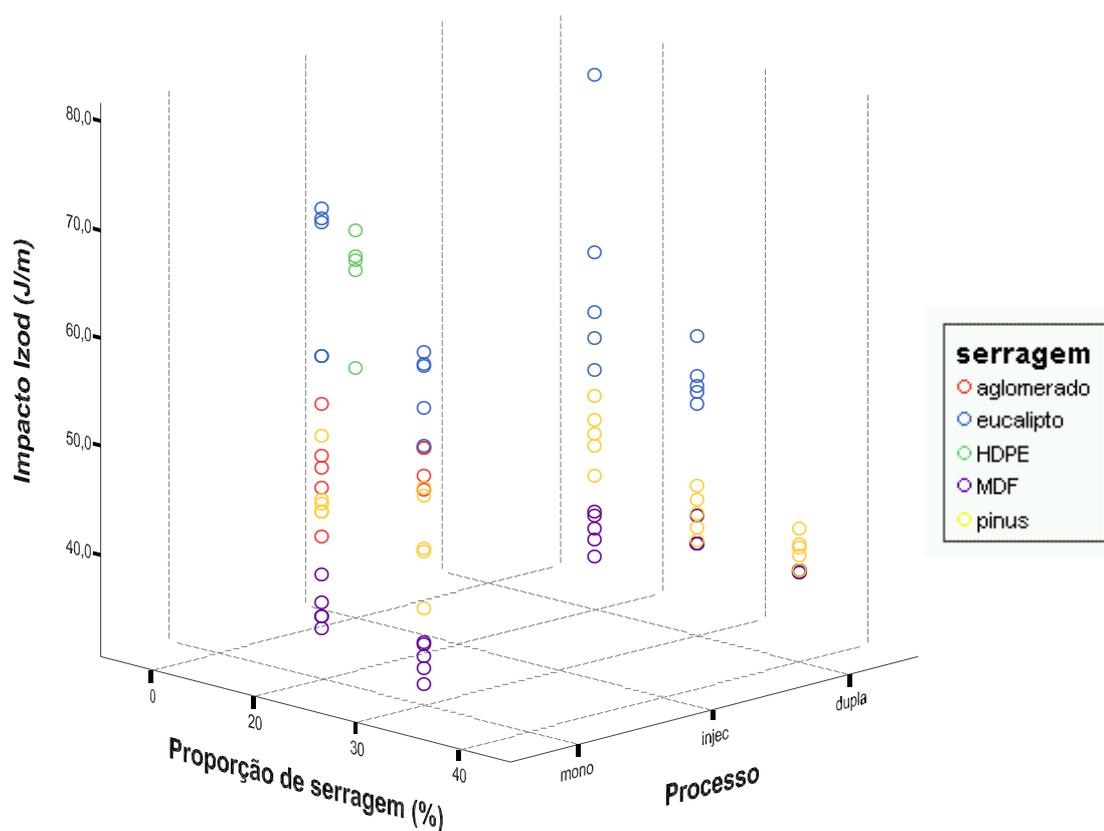
Outro fator de influência na resistência ao impacto, embora de menor proporção, é a cristalinidade do compósito. Também nesse caso, verifica-se que não houve um comportamento natural do material, pois os compósitos que apresentaram maior índice de cristalinidade foram os confeccionados com eucalipto e com aglomerado (seção 4.4.1).

Dessa forma, pressupõe-se que a distribuição das partículas deve ter contribuído mais para a resistência ao impacto do que a adesão na interface e a cristalinidade do compósito. De fato, tendo as partículas de aglomerado e de eucalipto uma granulometria média de maior tamanho, e estando distribuídas em determinadas regiões do v-HDPE, ou seja, formando agregados, proporcionariam maiores espaços entre os agregados de madeira preenchidos com v-HDPE. Isso proporcionaria grande absorção de energia nessas regiões, fazendo com que os compósitos apresentem maior resistência ao impacto.

Na Figura 66 são apresentados os valores de resistência ao impacto em função da proporção de serragem e do processo usado, para cada tipo de serragem. Pode-se notar que, embora exista influência da proporção de serragem, a influência do tipo de serragem é sentida com maior intensidade. É importante registrar também que, apesar da análise de variância do Anexo 7 não confirmar a influência do

processo usado, o teste de Tukey mostra diferença entre os valores médios de resistência ao impacto dos compósitos confeccionados em extrusora mono-rosca daqueles confeccionados na dupla-rosca. Na Figura 66, é possível visualizar também essa tendência.

FIGURA 66 - RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD DOS COMPÓSITOS EXTRUSADOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SERRAGEM E DO PROCESSO USADO PARA CADA TIPO DE SERRAGEM



4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

- A indústria moveleira da serra Gaúcha gera uma significativa quantidade de resíduo de madeira e derivados que, segundo a análise multivariada, pode ser caracterizada em função do porte da empresa e da matéria-prima usada. Esses resíduos constituem matéria-prima potencial para reforço em compósitos de HDPE.

- A maior quantidade de resíduo gerado no pólo moveleiro provém da madeira serrada, seguido do aglomerado, do MDF e do compensado, respectivamente. Foi estimada uma geração mensal de 1381 toneladas de serragem de madeira, 331,99 de MDF e 1209,11 de aglomerado nos municípios da pesquisa. Esses municípios representam aproximadamente 70% da produção de móveis do Estado do Rio Grande do Sul.

- A quantidade de resíduo gerado por classe de matéria-prima, para determinada empresa ou determinado município, pode ser estimada em função das variáveis: quantidade de matéria-prima consumida, número de colaboradores, número de máquinas, consumo de energia e consumo de água. Para os resíduos de madeira e para os resíduos de compensados, a inclusão das variáveis de produção não proporcionou melhora na precisão da estimativa. Ao contrário, o modelo para estimativa dos resíduos de MDF inclui todas as variáveis de produção testadas, mostrando que sua utilização melhora a precisão da estimativa. O modelo para estimativa da quantidade de resíduo de aglomerado gerado inclui, além da quantidade de matéria-prima consumida, o consumo de energia.

- A caracterização dos tipos de serragem usada nos experimentos mostrou heterogeneidade da granulometria de cada tipo. A análise por TGA e DSC mostrou que a temperatura de degradação foi semelhante para as três espécies de madeira estudadas (pinus, eucalipto e garapeira) e menores para a serragem de aglomerado e de MDF.

- Não houve diferença significativa nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos confeccionados com v-HDPE (virgem), em relação aos confeccionados com r-HDPE (reciclado), exceto para resistência ao impacto, onde o v-HDPE apresentou maiores valores. Todos os compósitos confeccionados apresentaram boas propriedades físico-mecânicas, atestando a viabilidade de aplicação industrial. A modelagem de misturas mostrou que a resistência à tração, a resistência à flexão, a dureza e a densidade das chapas, são determinadas pelo modelo linear, ou seja, são influenciadas apenas pelas características individuais de cada componente na mistura. Por outro lado, na resistência ao impacto, o v-HDPE e o r-HDPE, interagiram antagonisticamente, ou seja, provocando diminuição dessa propriedade. Esse fato foi atribuído à diferença de polaridade entre a resina virgem e a reciclada, ocasionada pela degradação e conseqüente aumento da polaridade do r-HDPE.

- Foi confirmada a eficácia do uso de um agente de acoplamento comercial nas propriedades físico-mecânicas de placas confeccionadas em misturador tipo Drais. Verificou-se que tanto para resistência à flexão como para resistência à tração o uso do agente de acoplamento Polybond 3009 ocasionou melhora nas propriedades mecânicas das chapas. O agente de acoplamento g-HDPE (confeccionado no laboratório) mostrou resultados inferiores ao comercial, mas superiores aos resultados encontrados para as chapas onde não se utilizou agente de acoplamento. As micrografias confirmaram que a dispersão da serragem no compósito foi melhor com o uso do agente de acoplamento comercial.

- O uso de diferentes tipos de serragem em compósitos confeccionados com misturador tipo Drais, mostrou influência significativa do tipo de serragem na densidade, na resistência à tração e na resistência à flexão das placas. A proporção de serragem influenciou os valores médios de densidade e MOE à flexão. A densidade das placas se correlacionou significativamente com todas as propriedades mecânicas analisadas, exceto com a resistência ao impacto. Também, foi encontrada correlação significativa da densidade com a proporção de serragem. As propriedades mecânicas que melhor se correlacionaram com a proporção de serragem nesse experimento foram o alongamento à flexão e o MOE à flexão

estática. A resistência à tração e à flexão não se correlacionaram com a proporção de serragem. Essas análises, aliadas ao fato de haver correlação significativa entre a resistência à tração e a resistência à flexão, sugerem que o MOE melhor expressa as propriedades de flexão estática do que a resistência na força máxima, nas condições desse experimento.

- Na análise de resistência à tração, os valores médios variaram de 12,66 MPa à 22,37 MPa, mostrando uma amplitude de variação relativamente alta. Não foi possível estabelecer a influência da proporção de serragem na resistência à tração, mesmo analisando cada tipo de serragem individualmente, fato atribuído à porosidade das placas provocada pela formação de bolhas no momento da prensagem. Verificou-se uma tendência contrária da serragem de pinus em relação às serragens de MDF e de garapeira. Enquanto a resistência à tração tem a tendência de aumentar para esses tipos de serragem, ocorre o inverso para pinus. Foi também verificada a tendência das placas confeccionadas com garapeira apresentarem valores médios de resistência à tração maiores que os valores observados para os outros dois tipos de serragem.

- Na resistência à flexão dos compósitos confeccionados em misturador tipo Drais, observou-se as mesmas influências observadas na resistência à tração para pinus e MDF, no entanto, a resistência à flexão dos compósitos confeccionados com Garapeira tende a diminuir com o aumento da proporção de serragem. Dessa forma, verifica-se que as propriedades de resistência à tração e à flexão mostraram comportamento semelhante, sendo as diferenças observadas entre os fatores mais pronunciadas para resistência à flexão.

- As análises das propriedades de flexão confirmam as afirmações de que o MOE melhor expressou a influência das variáveis analisadas, do que a resistência na força máxima, nas condições desse experimento. Os resultados reforçam a tese de que a porosidade das placas teve influência nas propriedades mecânicas dos compósitos.

- Nos compósitos confeccionados com misturador tipo Drais, os valores médios de resistência ao impacto não apresentaram diferenças entre os fatores proporção de serragem e tipo de serragem, embora tenham apresentado uma tendência do aumento dessa propriedade com o aumento da proporção de serragem. Essa tendência é contrária ao esperado e foi atribuída à dispersão de valores médios das placas confeccionadas com a mesma mistura. A porosidade das placas e a dispersão da serragem na matriz polimérica contribuíram para essa dispersão.

- A dureza dos compósitos apresentou uma correlação significativa com o alongamento e o MOE à flexão. Um aumento do alongamento, corresponde a uma diminuição da dureza e um aumento do MOE corresponde a um aumento da dureza. Verificou-se também que o seu comportamento em função da variação da proporção de serragem difere na espécie Garapeira, em relação aos outros dois tipos de serragem usados. Houve maior amplitude de valores médios de dureza para os fatores estudados do que nas outras propriedades mecânicas.

- A análise de DSC dos compósitos extrusados mostrou que, em geral, tanto àqueles preparados em extrusora mono-rosca como na dupla-rosca, tiveram uma tendência de agir como carga de reforço e agente nucleante. Para os compósitos fabricados com MDF na mono-rosca, foi observado um menor tempo de cristalização, fato que pode estar relacionado ao menor tamanho de partícula encontrado para este tipo de serragem. Porém, o crescimento cristalino inicial para os compósitos fabricados com eucalipto foi semelhante, somente diferindo quanto ao tempo de cristalização, que foi maior que o v-HDPE puro e os demais compósitos. Na extrusora dupla-rosca, como o fluxo cisalhante é maior, houve maior fragmentação nas partículas durante o processamento. Esse fato pode ter contribuído para a formação de cristais menores, mas maior número na extrusão com dupla-rosca, fazendo com que até 90% do processo a velocidade de cristalização fosse maior nesse tipo de extrusora. No entanto, o tempo total de cristalização foi menor do que na mono-rosca.

- As micrografias dos compósitos extrusados mostraram influência do tipo de serragem usada e do tipo de processo empregado na dispersão das fibras na matriz

polimérica. Nas serragens de eucalipto e de aglomerado houve a formação de agregados que não se dispersaram, sendo esse efeito mais pronunciado para a serragem de eucalipto. Com uso da extrusora de dupla-rosca esses agregados também ocorreram, mas em geral em menores proporções.

- A análise das propriedades mecânicas dos compósitos extrusados mostrou que a proporção de serragem apresentou correlação significativa com todas as propriedades mecânicas e com a densidade dos compósitos. A densidade dos corpos-de-prova, por sua vez, também apresentou correlação significativa com todas as propriedades mecânicas, o que a torna uma propriedade física de importância para caracterização dos compósitos. Em relação ao experimento com misturador tipo Drais, esse experimento apresentou a densidade dos corpos-de-prova como uma variável que melhor exprime as propriedades mecânicas dos compósitos e que melhor se correlacionou com a proporção de serragem. As causas apontadas para a melhor correlação entre as propriedades físico-mecânicas nesse experimento foram: a melhor adesão entre as fases de fibra e de matriz proporcionada por uma melhor homogeneidade das misturas, a menor porosidade dos corpos-de-prova e a menor variância experimental que o processo de extrusão/injeção proporcionou em relação ao processo mistura termocinética/compressão.

- A densidade dos compósitos extrusados foi influenciada pela proporção de serragem e pelo tipo de serragem usada. Houve interação dupla entre todas as variáveis estudadas. Não houve influência do processo usado e a interação tripla foi não significativa. Verificou-se que a interação entre o tipo de serragem e a proporção de serragem foi pequena, ao contrário, houve forte influência do processo na densidade dos compósitos quando variou-se a proporção de serragem e o tipo de serragem. A extrusão com mono-rosca causou maior aumento de densidade com o aumento da proporção de serragem, do que a extrusão com dupla-rosca. A serragem de pinus apresentou maior média de densidade na extrusão com dupla-rosca do que na mono-rosca, ao contrário de eucalipto e MDF.

- Na resistência à tração, verificou-se que houve influência de todos os fatores estudados e todas as interações entre eles. O tipo de serragem que apresentou os melhores resultados foi o MDF, quando produzido na extrusora de dupla-rosca e para a proporção de 40%. O valor médio mais baixo de resistência à tração foi da ordem de 19,32 Mpa, obtido para os compósitos produzidos com pinus na proporção de 20%, em extrusora mono-rosca. Todos os compósitos produzidos apresentaram valores médios de resistência à tração iguais ou superiores ao v-HDPE puro, confirmando que todos os tipos de serragem usados não causam a diminuição dessa propriedade. A resistência à dos compósitos aumenta com o aumento da proporção de serragem. Os compósitos de serragem de pinus apresentaram valores médios de resistência à tração inferiores aos demais, fato relacionado à madeira dessa espécie apresentar propriedades mecânicas inferiores. Para aglomerado e eucalipto, o fato de um aumento da proporção de madeira provocar menor aumento proporcional do que para pinus e MDF, indica que a adesão foi inferior, sendo melhor nos compósitos confeccionados com eucalipto do que com aglomerado. Em relação ao processo, foi observado que os compósitos produzidos em extrusora dupla-rosca apresentaram melhores resultados médios de resistência à tração que os resultados obtidos para os compósitos produzidos em mono-rosca. A maior influência do tipo de processo empregado foi verificado para a serragem de MDF processada em extrusora de dupla-rosca, pois a diferença do valor médio de resistência à tração do MDF processado nesse tipo de extrusora em relação aos compósitos processados em mono-rosca foi superior à diferença verificada para a serragem de pinus e de eucalipto. Individualmente, o fator de maior influência na resistência à tração dos compósitos foi o processo empregado, seguido da proporção de serragem e do tipo de serragem, respectivamente. Esse fato confirma a tese de que o controle dessas variáveis é fundamental para homogeneidade do produto final.

- A resistência à flexão apresentou correlação significativa com todas as outras variáveis analisadas, em especial com a resistência à tração, a proporção de serragem e a densidade dos compósitos. A análise de variância mostrou que houve influência das três variáveis estudadas e das interações entre elas. Todos os

compósitos apresentaram valores médios de resistência à flexão superiores ao v-HDPE puro. Foi encontrada relação entre a resistência à flexão e a proporção de serragem, independente do tipo de serragem e do tipo de extrusora utilizados. Embora a análise de variância tenha demonstrado que existe interação entre essas duas variáveis e a proporção de serragem, para todas as serragens usadas, um aumento da sua proporção causa um aumento da resistência à flexão. Os compósitos confeccionados com dupla-rosca apresentaram valores de resistência à flexão ligeiramente superiores aos apresentados pelos compósitos confeccionados com mono-rosca. Enquanto na extrusora dupla-rosca a serragem de MDF apresentou a média mais alta de valores de resistência à flexão, seguida do eucalipto e do pinus, respectivamente, na extrusão com mono-rosca, a serragem de eucalipto apresentou a média mais alta, seguida do MDF e do pinus, respectivamente. Numa análise da resistência à flexão em função da densidade, verifica-se que mantendo as outras variáveis independentes constantes, existe uma melhor correlação entre esses fatores. Como existe correlação significativa entre a densidade dos compósitos e a proporção de serragem, pode-se dizer que um aumento dessa proporção causa um aumento da resistência à flexão. Essa relação tem um comportamento diretamente proporcional e linear quando se mantêm os outros fatores constantes, mostrando que é possível estimar a resistência à flexão em função da densidade dos compósitos ou da proporção de serragem com boa precisão. Por fim, a serragem de MDF, na proporção de 40% e extrusada em dupla-rosca, apresentou os maiores valores de resistência à flexão. Por outro lado, os valores mais baixos foram observados para a serragem de pinus, na proporção de 20% e extrusada em mono-rosca.

- No alongamento à flexão dos compósitos extrusados, foi verificada influência da proporção de serragem e da interação “tipo de serragem x processo” e “proporção de serragem x processo”. Na medida em que aumenta a proporção de serragem, diminui o alongamento à flexão, independente do tipo de serragem e do processo usado. Foi verificado que o alongamento sofre uma maior influência da variação da proporção de serragem na extrusão com mono-rosca. Esse fato pode ser atribuído a melhor homogeneização obtida no processo com dupla-rosca, que proporciona

compósitos menos rígidos e menos quebradiços. Na extrusão com dupla-rosca, o MDF apresentou os valores mais baixos de alongamento à flexão, seguido do eucalipto e do pinus respectivamente. Na extrusão com mono-rosca, o eucalipto apresentou os menores valores médios, seguido do pinus e do MDF, respectivamente.

- Na análise do MOE à flexão dos compósitos extrusados verificou-se influência das três variáveis estudadas e da interação “tipo de serragem x proporção de serragem”. De forma inversa ao alongamento, na medida que aumenta a proporção de serragem, aumenta o MOE à flexão, no entanto, a influência da proporção de serragem é sentida com mais intensidade no MOE que no alongamento. Esse fato ocorre também quando se considera o tipo de processo usado e o tipo de serragem, ou melhor, quando se compara o MOE do v-HDPE puro com o MOE dos compósitos, seja qual for o tipo de serragem usado. Isso mostra que MOE melhor expressa a influência dessas variáveis nas propriedades de rigidez dos compósitos. Pelo teste de Tukey, verifica-se que não houve diferença de MOE entre os quatro tipos de serragem usada. Foi verificada diferença entre todas as proporções e entre os dois tipos de processos usados. Por outro lado, considerando apenas as misturas processadas em mono-rosca, é possível observar que a serragem de MDF e a de pinus foram significativamente inferiores à serragem de eucalipto e de aglomerado, mostrando que a espécie de madeira deve ter uma influência significativa na estrutura do material e, em consequência, nas suas propriedades. Nesse caso, eucalipto e aglomerado dão melhores respostas que pinus e MDF, sendo a diferença entre os MOE dessas espécies sentida com mais intensidade na proporção de 30% de serragem. Por fim, verifica-se também que o processo de mistura em extrusora dupla-rosca proporcionou maiores médias de MOE à flexão que o processo em mono-rosca.

- Visando determinar qual a parcela de influência no MOE é devida à granulometria média da serragem e qual parcela é devida à características inerentes à espécie de madeira, sugere-se a instalação de um experimento utilizando compósitos

confeccionados com serragem de mesma espécie de madeira e de diferentes granulometrias.

- A análise geral das propriedades de flexão mostra que o processo em dupla-rosca forma um compósito onde a interação entre as fases é melhor que em mono-rosca, onde o efeito sinérgico dessa interação causa valores médios maiores tanto no MOE como na resistência à flexão. Assim, diferente do verificado no experimento com misturador tipo Drais, tanto a análise da resistência à flexão como do MOE, expressam as propriedades de flexão dos compósitos. Resulta disso, a inferência de que o MOE é uma propriedade aplicável para tanto para compósitos com fraca adesão, como para àqueles com alta adesão entre as fases de fibra e matriz.

- Na resistência ao impacto houve influência do tipo de serragem, da proporção de serragem e das interações “tipo de serragem x proporção de serragem” e “tipo de serragem x processo”. A incorporação de serragem causa uma diminuição da resistência ao impacto em relação ao v-HDPE puro e um aumento da sua proporção no compósito diminui ainda mais essa resistência. Em função dos resultados obtidos e comparando com resultados verificados em outros trabalhos, pressupõe-se que a distribuição das partículas deve ter contribuído mais para a resistência ao impacto do que a adesão na interface e a cristalinidade do compósito. De fato, tendo as partículas de aglomerado e de eucalipto uma granulometria média de maior tamanho, e estando distribuídas em determinadas regiões do v-HDPE, ou seja, formando agregados, proporcionariam maiores espaços entre os agregados de madeira preenchidos com v-HDPE. Isso proporcionaria grande absorção de energia nessas regiões, fazendo com que os compósitos apresentem maior resistência ao impacto.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados discutidos e considerados no presente trabalho permitiram relacionar as seguintes conclusões:

- Existe uma significativa quantidade de resíduos de madeira e de seus derivados no pólo moveleiro da serra Gaúcha, que se constituem em matéria-prima potencial para reforço em compósitos com HDPE. A maior quantidade de resíduo gerado no pólo moveleiro provém da madeira serrada, seguido do aglomerado, do MDF e do compensado, respectivamente.
- Foi possível determinar modelos para estimativa da quantidade de resíduo gerado em cada classe em função das variáveis: quantidade de matéria-prima consumida, número de colaboradores, número de máquinas, consumo de energia e consumo de água, pois existe correlação significativa entre a quantidade de resíduo gerado e essas variáveis.
- Houve heterogeneidade da granulometria em cada tipo de serragem usada. A temperatura de degradação foi semelhante para as três espécies de madeira estudadas e menores para a serragem de aglomerado e de MDF.
- Em misturador tipo Drais, os compósitos confeccionados com r-HDPE (reciclado) apresentaram propriedades mecânicas semelhantes aos confeccionados com v-HDPE (virgem), exceto na resistência ao impacto, mostrando que o uso de material reciclado é viável.
- O uso de um agente de acoplamento comercial, a base de anidrido maleico, foi eficaz para promover melhor adesão entre as fases de fibra e matriz e melhorou as propriedades mecânicas dos compósitos confeccionados com misturador tipo Drais.
- Houve influência do tipo de serragem na densidade, na resistência à tração e na resistência flexão das placas confeccionadas com misturador tipo Drais. No entanto, nesse experimento, o MOE melhor expressou as propriedades de flexão do que a resistência na força máxima.
- Os compósitos extrusados mostraram que a serragem, independente do tipo e do processo usado, agiu como carga de reforço e agente nucleante. Houve influência

do tipo de serragem, da proporção e do processo usado na dispersão das fibras na matriz polimérica, confirmadas pelas análises de DSC e por SEM.

- A densidade dos corpos-de-prova extrusados se mostrou uma variável de importância para caracterização dos compósitos, pois apresentou correlação significativa com a proporção de serragem e com as propriedades mecânicas.

- Diferente do que ocorreu nos compósitos confeccionados com misturador tipo Drais, as propriedades de flexão dos compósitos extrusados foi expressa tanto pela análise da resistência na força máxima como pelo MOE.

- Todas as misturas realizadas por extrusão proporcionaram compósitos com valores médios de resistência à tração e à flexão maiores que o v-HDPE puro, pois houve adesão entre as fases devida a homogeneização da mistura e boa dispersão da serragem na matriz polimérica, que proporcionou a transferência da maior resistência da madeira para o compósito.

- Para essas propriedades, a serragem de MDF apresentou os maiores valores médios, enquanto a de pinus os valores médios mais baixos. Esse fato foi atribuído às propriedades de cada um desses materiais, às características morfológicas das partículas de serragem e à outras características inerentes ao tipo de serragem.

- A resistência ao impacto diminuiu com a incorporação de serragem no compósito. Nesse caso, os menores valores médios foram obtidos com serragem de MDF e os maiores valores médios com serragem de eucalipto, que não diferiu do v-HDPE puro, indicando que a distribuição das partículas teve maior efeito nessa propriedade do que a adesão na interface e do que a cristalinidade do compósito.

- Verificou-se que maiores valores de resistência à tração e à flexão foram obtidos pelo processo de dupla-rosca e para as maiores proporções de serragem, ocorrendo o inverso para resistência ao impacto, pois foi possível transferir as propriedades da madeira para o compósito de melhor forma na extrusão com dupla-rosca.

- Foi confirmada a viabilidade de produção dos compósitos polímero-madeira com diferentes tipos de serragem, em diferentes proporções e processados em extrusora mono e dupla-rosca. O controle dessas variáveis, no entanto, é de fundamental importância para qualidade do produto final.

Diante das conclusões obtidas, recomenda-se:

- Estudar a viabilidade do uso de menores proporções de agente de acoplamento nos compósitos extrusados, em função de seu relativo maior custo.
- Estudar a influência do tipo de serragem na cinética de cristalização dos compósitos, mantendo a granulometria da serragem constante, com objetivo de verificar qual parcela de influência se deve a granulometria do material.
- Comparar as propriedades de compósitos confeccionados com serragem de mesma espécie de madeira e de diferentes granulometrias, visando determinar qual a parcela de influência é devida à granulometria média da serragem e qual parcela é devida à características inerentes à espécie de madeira.
- Realizar estudos de viabilidade econômica dos compósitos confeccionados com diferentes proporções e tipos de resíduos, em diferentes processos.
- Por fim, recomenda-se também o estudo da viabilidade de confecção de compósitos com fibras de madeira obtidas de desfibramento termo-mecânico dos resíduos e com outros polímeros termoplásticos, visando obter compósitos reforçados para uso como materiais de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIEVE, R. M., VARGAS, M. A. Competitividade, capacitação tecnológica e inovação no arranjo produtivo moveleiro da Serra Gaúcha/RS - Brasil. **In: Pólos Moveleiros II - Linhares (ES) III - Ubá (MG) IV - Bento Gonçalves (RS)**. São Paulo: Abimóvel, 214 p. 2002.

ALMA, M. H., MALDAS, D., HAFIZOGLU H Water Repellency of Several Wood Species Impregnated with Vinyl Monomers. **Intern. J. Polymeric Mater**, v. 30, p. 159-165, 1995.

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

ASTM Standard D3878-01. **Standard terminology for composite materials**. ASTM International. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2001.

ASTM Standard D256-97. **Standard test methods for detemining the Izod Pendulum Impact resistance of plastics**. Annual book of ASTM standards. v. 08.01. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2000.

ASTM Standard D638-99. **Standard test method for Tensile properties of plastics**. Annual book of ASTM standards. v. 08.01. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2000.

ASTM Standard D790-99. **Standard test method for Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials**. Annual book of ASTM standards. v. 08.01. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2000.

ASTM Standard D 2240-97. **Standard test method for rubber property - durometer hardness**. Annual book of ASTM standards. v. 09.01. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2000.

AVELLA, M., MARTUSCELLI, E., PASCUCCI, B., RAIMO, M., FOCHER, B., MARZETTI, A. A New Class of Biodegradable Materials: Poly-3-hydroxy-butyrate/ Steam Exploded Straw Fiber Composites. I. Thermal and Impact Behavior. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 49, p. 2091-2103, 1993.

BALASURIYA, P. W., MAI, Y. -W. Mechanical properties of wood flake-polyethylene composites. Part I: effects of processing methods and matrix melt flow behaviour. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v 32, p. 619-629, 2001.

BARTKOWIAK, M., ZAKRZEWSKI, R. Thermal degradation of lignins isolated from wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 77, p. 295-304, 2004.

BATAILLE, P., ALLARD, P., COUSIN, P., SAPIEHA, S. Interfacial Phenomena in Cellulose/Polyethylene Composites. **Polymer Composites**, v 11, n 5, p. 301-304, october 1990.

BENGTSSON, M., GATENHOLM, P., OKSMAN, K. The effect of crosslinking on the properties of polyethylene/wood flour composites. **Composite Science and Technology**, 65 n. 10, p. 1468-1479, 2005.

BESHAY, A. D., KOKTA B.V., DANEULT C., Use of Wood Fibers in Thermoplastic Composites: II. Polyethylene **Polymer Composites**, v. 6, n. 4, p. 261-271, 1984.

BILLMEYER JR., F. W. **Textbook of polymer science**. USA: John Willey & Sons, 2 ed., 598 p. 1971.

BITTENCOURT, C. B. Procedimento de ensaio para avaliar propriedades ao cisalhamento de materiais compósitos – método da viga com entalhe em v. **Trabalho de Diploma**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá, 2001. Disponível em www.iem.efei.br/dpr/td/julho2001/pdf/Td092.pdf. Acesso em julho de 2005.

BLEDZKI, A. K., FARUK, O. Creep and impact properties of wood fibre-polypropylene composites: influence of temperature and moisture content. **Composites Science and Technology**. v. 64, p. 693 - 700, 2004.

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

BODIG, J., JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Reinhold Company, 1982.

BONELLI, C. M. C. Reciclagem de Plásticos Pós-consumidos. **Revista de Química Industrial**. n. 698, 1993.

BOURBAN, C., KARAMUK, E., DE FONDAUMIERE, M.J., RUFFIEUX, K., MAYER, J., E. WINTERMANTEL. Processing and Characterization of a New Biodegradable Composite Made of a PHB/V Matrix and Regenerated Cellulosic Fibers. **Journal of Environmental Polymer Degradation**, v. 5, N. 3, p. 159-166, 1997.

BRAND, M. A., HASSEGAWA, M. **Determinação da quantidade de resíduos madeiráveis gerados nas indústrias madeireiras em um raio de 150 km do município de Otacílio Costa**. Lages: Universidade do Planalto Catarinense, 67 p. 2005.

BRAND, M. A., KLOCK, U., MUÑIZ, G. I. B., SILVA, D. A. Avaliação do processo produtivo de uma indústria de manufatura de painéis por meio do balanço de material e do rendimento da matéria-prima. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.4, p.553-562, 2004.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.

CARASCHI, J. C., LEÃO, A. L. Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 6, p. 1599-1602, 2002.

CARVALHO, L. H., MEDEIROS, E. S., TOCCHETTO, R. S., SANTOS, I. M. G., SOUZA, A. G. Nucleating effect and dynamic crystallization of a poly(propylene)/talc system. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 66, p. 523-531, 2001.

CAULFLELD, D. F., JACOBSON, R. E., SEARS, K. D., UNDERWOOD, J. H. Woodpulp fibres as reinforcements for high-melting engineering thermoplastics for "under-the-hood" automotive applications. In: Conference Proceedings of the Polymer Processing Society - 17th annual meeting; 2001 May 21-24; Montreal, Canada. **Anais...** Montreal, Canada: Polymer Processing Society, 10 p., 2001.

CLEMONS C. M., IBACH, R. E. Effects of processing method and moisture history laboratory fungal resistance of wood-HDPE composites. **Forest Products Journal**. v. 54, n. 4, p. 50-57, 2004.

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

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

COUTTS, R. S. P. From forest to factory to fabrication. In: **International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete**, 4, 1992, Sheffield. **Proceedings...** London: E & FN Spon, p.31-47, 1992.

CZARNECKI L., WHITE, J.L. Shear flow rheological properties, fiber damage and mastication characteristics of aramid-, glass- and cellulose-fiber-reinforced polystyrene melts. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 25, p. 1217-1244, 1980.

DIAS, F. M., LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedade de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 102-113, 2004.

ECKER, V.; CUNHA A.B.; MODESTI, L.G. Avaliação do processo produtivo de uma indústria de painéis sarrafeados. In: 8º CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: p. 313-314, 2003.

ELEOTÉRIO, J. R. Propriedades Físicas e Mecânicas de Painéis MDF de Diferentes Densidades e Teores de Resina. Piracicaba, 2000. 121 p. **Dissertação (Mestrado em Ciências)** – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000.

ENGLISH, B., YOUNGQUIST, J. A., KRZYSIK, A. M. Lignocellulosic Composites in: **Cellulosic polymers blends and composites**. p. 115–130, New York: Hanser Publishers, 1994.

ENGLISH, B. Wood Fiber-Reinforced Plastics in Construction. in **Proceedings of International conference on woodfiber-plastic composites**. Madison: Forest Products Society, p 79-81, 1997.

FALK, R. H., VOS, D., CRAMER S. M. The comparative performance of woodfiber-plastic and wood-based panels. in: **The Fifth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites**. Madison: Forest Products Society, p. 269-274, 1999.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación). **Actas de la consulta mundial sobre paneles a base de madera**. Roma, 245 p., 1975.

FONSECA, F. M. C. Desenvolvimento e caracterização de compósitos à base de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) reciclado e fibras vegetais. Belo Horizonte, 2005. 133 p. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)** - Universidade Federal de ouro Preto, 2005

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

GATENHOLM, P.; FELIX, J.; KLASON, C.; KUBÁT, J. in **Proceedings of International conference on woodfiber-plastic composites**. USDA Forest Service: Madison, Wisconsin, USA, 1993

GEETHAMMA, V.G., MATHEW, K.T., LAKSHMINARAYANAN, R., THOMAS, S. Composites of Short Coir Fibers and Natural Rubber: Effect of Chemical Modification, Loading and Orientation of Fiber. **Polymer**, v. 39, n. 6-7, p.1483-1491, 1997.

GERWING, J., VIDAL, E., VERÍSSIMO, A., UHL, C. Rendimento no Processamento de Madeira no Estado do Pará. **Série Amazônia N° 18**. Belém: Imazon, 38 p., 2001.

GLASSER W. G., RIALS T. G., KELLEY S. S., DAVÉ, V. Studies of the Molecular Interaction Between Cellulose and Lignin as a Model for the Hierarchical Structure of Wood. **American Chemical Society**, Washington, DC, 1998.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: SP, 242 p., 2000.

GORNI, A. A. A Evolução dos Materiais Poliméricos ao Longo do Tempo. www.gorni.hpg.ig.com.br, 2001.

GRISON, K. **Reciclagem de resíduos de medium density fiberboard e poliestireno de alto impacto**. 2004. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Polímeros), Universidade de Caxias do Sul, 2005.

GUÉRON, A. L. & GARRIDO, V. Requisitos ambientais, acesso a mercados e competitividade na indústria de madeira e móveis do Brasil. **Ponto Focal de Barreiras Técnicas às Exportações**. Rio de Janeiro: Inmetro, 38 p., 2004.

GURRAM, S., JULSON, J. L., MUTHUKUMARRAPAN, K., STOKKE*, D. D., MAHAPATRA, A. K. Application of Biorenewable Fibers in Composites. 2002 **ASAE/CSAE North Central Intersectional Conference**. Department of Agricultural and Bioresource Engineering - University of Saskatchewan Saskatoon: Canadá, September 27-September 28, 2002.

HARPER, C. A. **Handbook of plastics, Elastomers and Composites**. 3 ed. Nova York: The McGraw – Hill Companies, 677 p., 1996.

HENDENBERG, P., GATENHOLM, P. Conversion of Plastic/Cellulose Waste into Composites. I. Model of Interphase. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 56, p. 641-651, 1995.

HIERARQUIA SÓCIO-ECONÔMICA DE BENTO GONÇALVES. Bento Gonçalves: CFP Senai de Artes Gráficas, 29 ed., 144 p., 2000.

HILLIG, É., AGUZZOLI, C., FREIRE, E., MANSAN, M. A. Estudo de diferentes granulometrias e proporções de resíduos de madeira (serragem) misturados com PEDB. In: **Sulmat 2002 - Congresso em Ciências de Materiais do Mercosul**. Joinville, SC: Tec Art Editora Ltda, p. 308-315, 2002.

HILLIG, É., SCHNEIDER, V. E., PAVONI, E. T. Diagnóstico da geração de resíduos e dos sistemas de gestão ambiental das empresas do pólo moveleiro da serra Gaúcha. in: **Pólo moveleiro da serra Gaúcha : Geração de resíduos e perspectivas para sistemas de gerenciamento ambiental**. Caxias do Sul: EducS, 165 p., 2004.

HWANG, CHIN-YIN; HSE, CHUNG-Y.; CHOONG, E. T. Effect of configuration and some processing variables on the properties of wood fiber-polyethylene composites. In: **Proceedings of the International Conference on Effective Utilization of Plantation Timber "Timber and Wood Composites for the Next Century"**. May 21-23, 1999. Chi-Tou, Taiwan: Forest Products Association of R.O.C., Bulletin n. 16, 1999.

IBQP- Instituto Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Paraná. **Análise da competitividade da cadeia produtiva da madeira no estado do Paraná**. Curitiba: IBQP, 345 p., 2002.

INSTITUTO PRÓ-NATURA. **Manejo Florestal e Geração de Resíduos Energéticos no Noroeste de Mato Grosso**. Campo Grande: Instituto Pró-Natura, 15 p., 2002.

JOLY, C., GAUTHIER, R., CHABERT, B. Physical Chemistry of the Interface in Polypropylene/ Cellulosic Fiber Composites. **Composites Science and Technology**, v. 56, p. 761-765, 1996.

KAMDEM, D. P., HAIHONG, J., CUI, W., 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, p. 347-355, 2004.

KILLOUGH, J. M. The plastic side of the equation. In: **Wood fiber plastic composites: virgin and recycled wood fiber and polymers for composites**. Madison, WI: Forest Products Society, p. 7-15, 1996.

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

KIM, J. P., YOON, T. H., MOON, S. P., RHEE, J. M., LEE, J. S. Wood-polyethylene composites using ethylene-vinil alcohol copolymer as adhesion promoter. **Bioresource Technology**, 2005. Article in press.

KOCK, P. **Material balances and energy required for manufacture of ten wood commodities. Energy and the wood products industry**. Georgia: Forest Products Research Society, 173p., 1976.

KOLLMANN, F. F. P., CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. v. I. Berlin: Springer-Verlag, 1968.

KOLLMANN, F. F. P., KUENZI, E. W., STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology II: wood based materials**. New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 703 p., 1975.

LABOSKY Jr., P.; YOBP, R. D.; JANOWIAK, J. J.; BLANKENHORN, P. R. Effect of steam pressure refining and resin levels on the properties of UF-bonded red maple MDF. **Forest Products Journal**, v.4 3, n. 11/12, p. 82 - 88, 1993.

LAI, S. M., YEH, F. C., WANG, Y., CHAN, H. C., SHEN, H. F. Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene / wood flour composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v 87, p. 487-496, 2003.

LEÃO, A. L., ROWELL, R., TAVARES, N. Applications of natural fibers in automotive industry in brazil - thermoforming process. **Science and Technology of Polymers and Advanced Materials**. Edited by P. N. Prasad et al., Plenum Press: New York, p. 755 - 761, 1998.

LI, T. Q., WOLCOTT, M. P. Rheology of HDPE-wood composites. I. Steady state shear and extensional flow. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, p. 303-311, 2004.

LIMA, E. G. Diagnóstico ambiental de empresas de móveis em madeira situadas no pólo moveleiro de Araçongas - PR. Curitiba, 2005. 134 p. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)** - Universidade Federal do Paraná, 2005.

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

MALDAS, D., KOKTA, B.V. Influence of polar monomers on the performance of wood fiber reinforced polystyrene composites. I. Evaluation of critical conditions. **Intern. J. Polymeric Mater.** v. 14, p. 165-189, 1990.

MALDAS, D., SHIRAISHI, N. Liquefaction of wood in the presence of polyol using NaOH as a catalyst and its application to polyurethane foams. **Intern. J. Polymeric Mater.** v. 33, p. 61-71, 1996.

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

MANO, E. B. **Introdução a Polímeros**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 108 p., 1985.

MARTINS G. S., OLIVEIRA, E. M., OLIVEIRA, D. E., LIMA, M. A. C. **Otimização do Conteúdo de Lignina na Cana-de-Açúcar Visando o Seu Uso na Indústria de Papel e Alimentação Animal**. UERJ, 2000

MARTINS, G. S., IOZZI, M. A., MARTINS, M. A., MATTOSO, L. H. C., FERREIRA, F. C. Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, n. 5, v. XIV, p. 326-333, 2004.

MILLER M. **A reciclagem do plástico**. Disponível em www.unicamp.br/fea/ortega/temas530/mariana.htm. Acesso em abril de 2006.

MONTENEGRO, R. S. A., ZAPORSKI, J., RIBEIRO, M. C. M. Polietileno de alta densidade (PEAD). **Relato Setorial**. Disponível em www.bndes.gov.br/conhecimento/relato/peadx.pdf. Acesso em abril de 2006.

MORAES, M. A. F. D. **Estudo da competitividade de cadeias integradas no Brasil: impactos das zonas de livre comércio. Cadeia: Madeira e Móveis**. Nota Técnica Final. UNICAMP-IE-NEIT, Campinas, 212 p., 2002.

MOHANTY, A. K., MISRA, M. Studies on jute composites - A literature review. **Polym. - Plast. Technol. Eng.**, v. 34, n. 5, p. 729-792, 1995.

NAGARAJAN, K., LEVON, K., MYERSON, A. S. Nucleating agents in polypropylene **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 59, p. 497-508, 2000.

NELSON, N. D. Effects of wood and pulp properties on medium-density, dry-formed hardboard. **Forest Products Journal**, v. 23, n. 9, p. 72-80, 1973.

NETO, B. B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: SP, Editora da Unicamp, 2001.

OLANDOSKI, D.P. Rendimento, resíduos e considerações sobre melhorias no processo em indústrias de chapas compensadas. 2001, 85 f. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

OS DESAFIOS DE ENSINO E PESQUISA NA COMUNIDADE ACADÊMICA DE POLÍMEROS NO PAÍS. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Jul/Set - 99, p. 6-9, 1999.

PANSHIN, A. J. & ZEEUW DE C. **Textbook of Wood Technology**. McGraw-Hill, New York, 1970.

PAPAGEORGIOU, G. Z., ACHILIAS, D. S., BIKIARIS, D. N., KARAYANNIDIS, G. P. Crystallization kinetics and nucleation activity of filler in polypropylene/surface-treated SiO₂ nanocomposites. **Thermochimica Acta**, v. 427, p 117-128, 2005.

PARK, B.; RIEDL, B.; KIM, Y. S. Anatomical characteristics of wood fibers for medium density fiberboard (MDF) manufacture. In.: Pacific Regional Wood Anatomy Conference, 4, 1998. **IAWA Journal**, v. 19, n. 4, p. 472, 1998.

PINHOPÓ. **Farinha de madeira - wood flour**. Disponível em www.pinhopo.com.br. Acesso em abril de 2006.

POLZL, W. B. Eficiência produtiva e econômica do segmento industrial da madeira compensada no Estado do Paraná. 2002, 114 f. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

RADIOBRAS - CIÊNCIA, TECNOLOGIA & MEIO-AMBIENTE Serrarias geram 620 mil toneladas de serragem por ano. www.radiobras.gov.br/abrn/c&t/1997/coluna_090597.htm., maio, 1997.

RAJ, R.G., KOKTA, B.V., MALDAS, D., DANEAUT, C. Use of Wood Fibers in Thermoplastics: VII. The Effect of Coupling Agents in Polyethylene/Wood Fiber Composites. **J. App. Polymer Sci.**, v. 37, p. 1089-1103, 1989.

RAJ, R.G. KOKTA, B.V., DANEAUT, C. Polypropylene/Wood Fiber Composites: Effect of Fiber Treatment on Mechanical Properties. **Intern. J. Polymeric Mater.**, v. 12, p. 239-250, 1989.

RATNER B.D., HOFFMAN A.S., SCHOEN F.J., LEMONS J.E. editors. **Biomaterials science: An introduction to materials in medicine**. Orlando, FL: Academic; 1996.

RIALS, T. G., WOLCOTT, M. P., YIN, S. **Interfacial Structure and Properties of Wood/Polypropylene Composites**, Pineville, LA, Washington State University, Pullman, WA, 2000.

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

ROESE, M. Política industrial e de C&T regional: sistemas de inovação regionais. O caso da aglomeração moveleira de Bento Gonçalves / RS. **Revista Eletrônica de Administração**. v. 6, n. 4, UFRGS, novembro/2000.

ROSE, J. Equipment overcomes - some knotty problems. **Modern Plastics**, March, p. 40-41, 2002.

RUCH, J., FRITZ, H., BÜRKLE, E., ZIMMET, R. Transformação direta facilita a moldagem plásticos reforçados com fibras naturais. **Plástico Industrial**, n. 68, p. 44-63, abril de 2004.

SAHEB, D. N., JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: a review. **Advances in Polymer Technology**. v. 18, n. 4, p. 351-363, 1999.

SANADI, A. R., HUNT, J.F., KOVACSVOLGYI, G., CAULFIELD, D. F. High-Fiber/Low-Matrix Composites: Kenaf Fiber/Polypropylene. In: 6th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, May 15-16, 2001. **Anais...** Madison, Wisconsin: USDA Forest Service, 2001.

SANTINI, E. J., HASELEIN, C. R., GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000.

SAVASTANO JR., H & AGOPYAN, V Fibras naturais para produção de componentes construtivos. **Curso Internacional Materiales Compuestos Fibrorreforzados**. Cali, Colombia, Universidad del Valle / Cytod Proyecto VIII.5, 1998.

SCHNEIDER, H. P. As tendências mundiais na fabricação de perfis e tubos de PVC. **Plástico Industrial**. p. 72-83, Março de 2002.

SCHNEIDER, V. E., HILLIG, É., BERTOTTO FILHO, L. A., RIZZON, M. R. Geração de resíduos de madeira e derivados no polo moveleiro da serra gaúcha - diagnóstico e indicativos para o gerenciamento ambiental na indústria moveleira. In: XI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004, Natal - RN - Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004.

SEARS et al. Reinforcement of Engineering Thermoplastics with High-Purity Wood Cellulose Fibers. **6th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites**. Madison, Wisconsin, USA, 2001.

SEAVEY, K. C. Lyocell Fiber-Reinforced Cellulose Ester Composites - Surface and Consolidation Considerations, and Properties. 1999, 150 p. **Master's Thesis** (Masters of Science in Wood Science and Forest Products). Department Wood Science and Forest Products. Blacksburg, Virginia, 1999.

SELKE, S., CHILDRESS, J. Wood Fiber/High Density Polyethylene Composites: Ability of Additives to Enhance Mechanical Properties. **Wood-Fiber-Polymer Composites: Fundamental Concepts, Processes and Material Options**. Forests Products Society, edited by M.P. Wolcott, p. 109-111, 1993.

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

SILVA, J. C. G. L. da. Análise da eficiência econômica da indústria de compensados do estado do Paraná. 1987. 155 f. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1987.

SILVA, A. L. N., ROCHA, M. C. G., GUIMARÃES, M. J. O. C., LOVISI, H. Desenvolvimento de Materiais à Base de Poliolefinas e Elastômeros Metalocênicos. **Polímeros**, v.11 n. 3, São Carlos: 2001.

SIMONSEN, J. Efficiency of reinforcing materials in filled polymer composites. **Forest products journal**. v. 47, n. 1, p. 74-81, 1997.

SINGH, A. P.; McDONALD, A. G. Comparison of radiata pine and rubberwood HTMP fibers by microscopy and MDF panel properties. In.: PACIFIC REGIONAL WOOD ANATOMY CONFERENCE, 4, 1998. **IAWA Journal**, v. 19, n. 4, p. 479, 1998.

SOSA GRIFFIN, M. **Utilización de materias primas vegetales para la producción de materiales de construcción: análisis crítico**. Caracas, p.11, 1994. Trabajo Especial (Agregado) - Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela., 1994.

STARK, N. M. Wood fiber derived from scrap pallets used in polypropylene composites. **Forest Products Journal**, v. 49, n. 6, p. 39-46, Jun. 1999.

STARK, N. M., MATUANA, L. M. Photostabilization of wood flour filled HDPE composites. In : **Proceedings of ANTEC**, May 5-9, 2002. San Francisco, CA: Society of Plastics Engineers. v. 2, p. 2209-2213, 2002

STARK, N. M., MATUANA, L. M., CLEMONS, C. M. Effect of Processing Method on Accelerated Weathering of Woodflour-HDPE Composites. In: **Seventh International Conference on Woodfiber-Plastic Composites (and other natural fibers)**, May 19-20, 2003. Madison: Forest Products Society, p. 79-87, 2003.

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

SUCHSLAND, O; WOODSON, G.E. **Fiberboard manufacturing practices in United States**. Washington, DC:USDA, 236 p. (USDA Agricultural Handbook N° 640), 1986.

TECNOLOGIA PRODUZ MADEIRA PLÁSTICA. **Plástico Moderno**, n. 315, 2000. Disponível em <http://www.plastico.com.br/revista/pm315/extrusoras4.htm>. Acesso em Novembro de 2004.

TEIXEIRA, D. E., MOREIRA, J. M. M. Á. P., COSTA, A. F. DA. Confecção de composto de madeira-plástico utilizando resíduos de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden e polietileno de baixa densidade (PEBD). **Floresta e Ambiente**, v 9, n 1, p. 72-80, jan./dez. 2002.

TITA, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados**. 1999. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL. Desenvolvimento de misturas de poliolefinas recicladas com resíduos de madeira para utilização em componentes para a indústria moveleira e solados para indústria calçadista. **Proposta para Pré-qualificação ao Programa de Apoio a Pesquisa nas Empresas - PAPPE**. Caxias do Sul: Laboratório de Polímeros, UCS, 2004.

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL. **Convênio de cooperação tecnológica - Única Termoplásticos Ltda**. UCS: Caxias do Sul, novembro de 2005.

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

WOLCOTT, M.P. Production methods and platforms for wood plastics. **Non-Wood Substitutes for Solid Wood Products Conference**. Melbourne, Austrália: October 20-22, 2003.

WOODHAMS, R. T., THOMAS G., RODGERS, D. K. Wood Fibers as Reinforcing Fillers for Polyolefins. **Polym. Eng. and Sci.**, v. 24, n. 15, p. 1166, 1984.

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

YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. 2004

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

YOUNGQUIST, J. A. Wood-based composites and panel products. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Washington: Forest Products Society, 428 p., 1999.

ANEXOS

ANEXO 1 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DOS COMPÓSITOS E TESTES DE MÉDIAS (TUKEY) PARA CADA UM DOS FATORES ESTUDADOS.

Dependent Variable: DENSIDADE DOS COMPÓSITOS

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	,076(a)	16	,005	244,916	,000
Intercept	56,369	1	56,369	2889578,487	,000
SERRAGEM	,001	3	,000	23,395	,000
PROSER	,040	2	,020	1021,129	,000
PROCESSO	2,073E-05	1	2,073E-05	1,062	,306
SERRAGEM * PROSER	,001	4	,000	6,754	,000
SERRAGEM * PROCESSO	,002	2	,001	41,560	,000
PROSER * PROCESSO	,001	1	,001	44,916	,000
SERRAGEM * PROSER * PROCESSO	1,007E-05	2	5,036E-06	,258	,773
Error	,001	68	1,951E-05		
Total	81,002	85			
Corrected Total	,078	84			

a R Squared = ,983 (Adjusted R Squared = ,979)

DENSIDADE

Tukey HSD

SERRAGEM	N	Subset		
		1	2	3
HDPE	5	,90615		
aglome	10		,97640	
MDF	25		,97798	
eucal	20		,97950	,97950
pinus	25			,98412
Sig.		1,000	,445	,098

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 1,951E-05.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,628.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

DENSIDADE

Tukey HSD

PROSER	N	Subset			
		1	2	3	4
0	5	,90615			
20	35		,95506		
30	35			,99264	
40	10				1,02371
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 1,951E-05.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,200.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

DENSIDADE

Tukey HSD

PROCESSO	N	Subset		
		1	2	3
injec	5	,90615		
mono	40		,97461	
dupla	40			,98555
Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 1,951E-05.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 12,000.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

ANEXO 2 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E TESTES DE MÉDIAS (TUKEY) PARA CADA UM DOS FATORES ESTUDADOS.

Dependent Variable: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1569,185(a)	16	98,074	127,248	,000
Intercept	38269,905	1	38269,905	49653,911	,000
SERRAGEM	310,815	3	103,605	134,424	,000
PROSER	278,263	2	139,132	180,519	,000
PROCESSO	352,256	1	352,256	457,040	,000
SERRAGEM * PROSER	13,397	4	3,349	4,345	,003
SERRAGEM * PROCESSO	44,279	2	22,140	28,726	,000
PROSER * PROCESSO	9,504	1	9,504	12,331	,001
SERRAGEM * PROSER * PROCESSO	16,748	2	8,374	10,865	,000
Error	52,410	68	,771		
Total	56921,409	85			
Corrected Total	1621,595	84			

a R Squared = ,968 (Adjusted R Squared = ,960)

TRACAO

Tukey HSD

SERRAGEM	N	Subset			
		1	2	3	4
HDPE	5	19,3640			
pinus	25		23,7388		
aglome	10			25,0370	
eucal	20			25,8840	
MDF	25				28,3888
Sig.		1,000	1,000	,149	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = ,771.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,628.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

TRACAO

Tukey HSD

PROSER	N	Subset			
		1	2	3	4
0	5	19,3640			
20	35		24,1049		
30	35			25,6131	
40	10				33,1110
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = ,771.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,200.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

TRACAO

Tukey HSD

PROCESSO	N	Subset		
		1	2	3
injec	5	19,3640		
mono	40		23,0640	
dupla	40			28,7170
Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = ,771.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 12,000.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

ANEXO 3 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO E TESTES DE MÉDIAS (TUKEY) PARA CADA UM DOS FATORES ESTUDADOS.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: FLEXAO

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4834,296 ^a	16	302,143	668,115	,000
Intercept	66966,179	1	66966,179	148078,951	,000
SERRAGEM	610,558	3	203,519	450,032	,000
PROSER	1803,948	2	901,974	1994,490	,000
PROCESSO	335,783	1	335,783	742,499	,000
SERRAGEM * PROSER	82,810	4	20,703	45,779	,000
SERRAGEM * PROCESSO	130,743	2	65,371	144,552	,000
PROSER * PROCESSO	8,588	1	8,588	18,991	,000
SERRAGEM * PROSER * PROCESSO	26,957	2	13,479	29,805	,000
Error	30,752	68	,452		
Total	105058,870	85			
Corrected Total	4865,048	84			

a. R Squared = ,994 (Adjusted R Squared = ,992)

FLEXAO

Tukey HSD^{a,b,c}

SERRAGEM	N	Subset			
		1	2	3	4
HDPE	5	19,450			
pinus	25		32,350		
eucal	20			35,168	
aglome	10			35,389	
MDF	25				38,202
Sig.		1,000	1,000	,931	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = ,452.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,628.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- Alpha = ,05.

FLEXAOTukey HSD^{a,b,c}

PROSER	N	Subset			
		1	2	3	4
0	5	19,450			
20	35		30,123		
30	35			36,907	
40	10				47,502
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = ,452.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,200.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- c. Alpha = ,05.

FLEXAOTukey HSD^{a,b,c}

PROCESSO	N	Subset		
		1	2	3
injec	5	19,450		
mono	40		31,975	
dupla	40			38,552
Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = ,452.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 12,000.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- c. Alpha = ,05.

ANEXO 4 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO ALONGAMENTO À FLEXÃO E TESTES DE MÉDIAS (TUKEY) PARA CADA UM DOS FATORES ESTUDADOS.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: ALONGF

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	25,389(a)	16	1,587	6,499	,000
Intercept	2377,519	1	2377,519	9737,872	,000
SERRAGEM	1,408	3	,469	1,922	,134
PROSER	5,653	2	2,827	11,578	,000
PROCESSO	,417	1	,417	1,707	,196
SERRAGEM * PROSER	1,037	4	,259	1,062	,382
SERRAGEM * PROCESSO	2,116	2	1,058	4,333	,017
PROSER * PROCESSO	1,782	1	1,782	7,298	,009
SERRAGEM * PROSER * PROCESSO	,467	2	,233	,955	,390
Error	16,602	68	,244		
Total	3232,596	85			
Corrected Total	41,991	84			

a R Squared = ,605 (Adjusted R Squared = ,512)

ALONGF

Tukey HSD

SERRAGEM	N	Subset	
		1	2
aglome	10	5,837	
pinus	25	5,971	
eucal	20	6,031	
MDF	25	6,164	
HDPE	5		7,680
Sig.		,505	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = ,244.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,628.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

ALONGF

Tukey HSD

PROSER	N	Subset		
		1	2	3
40	10	5,726		
30	35	5,804	5,804	
20	35		6,342	
0	5			7,680
Sig.		,982	,057	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = ,244.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,200.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

ALONGF

Tukey HSD

PROCESSO	N	Subset	
		1	2
mono	40	5,981	
dupla	40	6,078	
injec	5		7,680
Sig.		,880	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = ,244.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 12,000.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

ANEXO 5 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MOE À FLEXÃO E TESTES DE MÉDIAS (TUKEY) PARA CADA UM DOS FATORES ESTUDADOS.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: MOEF

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	12779271,976(a)	16	798704,498	22,010	,000
Intercept	107019762,067	1	107019762,067	2949,129	,000
SERRAGEM	960349,875	3	320116,625	8,821	,000
PROSER	5486958,450	2	2743479,225	75,602	,000
PROCESSO	393655,140	1	393655,140	10,848	,002
SERRAGEM * PROSER	806126,614	4	201531,653	5,554	,001
SERRAGEM * PROCESSO	124496,491	2	62248,245	1,715	,188
PROSER * PROCESSO	102079,725	1	102079,725	2,813	,098
SERRAGEM * PROSER * PROCESSO	217536,661	2	108768,331	2,997	,057
Error	2467624,620	68	36288,597		
Total	177219968,150	85			
Corrected Total	15246896,596	84			

a R Squared = ,838 (Adjusted R Squared = ,800)

MOEF

Tukey HSD

SERRAGEM	N	Subset	
		1	2
HDPE	5	568,020	
pinus	25		1406,444
MDF	25		1421,276
aglome	10		1452,750
eucal	20		1463,765
Sig.		1,000	,950

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 36288,597.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,628.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

MOEF

Tukey HSD

PROSER	N	Subset			
		1	2	3	4
0	5	568,020			
20	35		1175,199		
30	35			1503,175	
40	10				2075,270
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 36288,597.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,200.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

MOEF

Tukey HSD

PROCESSO	N	Subset		
		1	2	3
injec	5	568,020		
mono	40		1292,633	
dupla	40			1569,762
Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 36288,597.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 12,000.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

ANEXO 6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MOE À FLEXÃO E TESTES DE MÉDIAS (TUKEY) PARA CADA UM DOS FATORES, CONSIDERANDO APENAS OS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS EM EXTRUSORA MONO ROSCA.

Between-Subjects Factors

		N
SERRAGEM	aglome	10
	eucal	10
	MDF	10
	pinus	10
PROSER	20	20
	30	20

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: MOEF

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3083491,739 ^a	7	440498,820	18,628	,000
Intercept	66835977,055	1	66835977,055	2826,411	,000
SERRAGEM	854160,371	3	284720,124	12,040	,000
PROSER	1919644,689	1	1919644,689	81,179	,000
SERRAGEM * PROSER	309686,679	3	103228,893	4,365	,011
Error	756702,210	32	23646,944		
Total	70676171,004	40			
Corrected Total	3840193,949	39			

a. R Squared = ,803 (Adjusted R Squared = ,760)

Post Hoc Tests

MOEF

Tukey HSD^{a,b}

SERRAGEM	N	Subset	
		1	2
MDF	10	1092,890	
pinus	10	1214,731	
eucal	10		1410,160
aglome	10		1452,750
Sig.		,305	,925

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = 23646,944.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10,000.

b. Alpha = ,05.

ANEXO 7 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO E TESTES DE MÉDIAS (TUKEY) PARA CADA UM DOS FATORES ESTUDADOS.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: IMPACTO

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	8237,469(a)	16	514,842	30,722	,000
Intercept	151838,763	1	151838,763	9060,525	,000
SERRAGEM	5754,047	3	1918,016	114,452	,000
PROSER	120,378	2	60,189	3,592	,033
PROCESSO	55,392	1	55,392	3,305	,073
SERRAGEM * PROSER	271,714	4	67,929	4,053	,005
SERRAGEM * PROCESSO	191,917	2	95,958	5,726	,005
PROSER * PROCESSO	1,230	1	1,230	,073	,787
SERRAGEM * PROSER * PROCESSO	32,405	2	16,202	,967	,385
Error	1139,563	68	16,758		
Total	207176,469	85			
Corrected Total	9377,032	84			

a R Squared = ,878 (Adjusted R Squared = ,850)

IMPACTO

Tukey HSD

SERRAGEM	N	Subset			
		1	2	3	4
MDF	25	37,616			
pinus	25		44,626		
aglome	10			51,389	
eucal	20				61,019
HDPE	5				62,010
Sig.		1,000	1,000	1,000	,977

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 16,758.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,628.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

IMPACTO

Tukey HSD

PROSER	N	Subset		
		1	2	3
40	10	39,839		
30	35		47,033	
20	35		49,879	
0	5			62,010
Sig.		1,000	,360	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 16,758.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 11,200.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.

IMPACTO

Tukey HSD

PROCESSO	N	Subset		
		1	2	3
dupla	40	45,215		
mono	40		49,543	
injec	5			62,010
Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 16,758.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 12,000.

b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c Alpha = ,05.