

OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DE COMPÓSITOS A BASE DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E FIBRAS DE BANANEIRA

Thiago Santiago Gomes

Dissertação em Ciência e Tecnologia de Polímeros, submetida ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências, em Ciência e Tecnologia de Polímeros, sob orientação das Professoras Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Leila Lea Yuan Visconte.

Rio de Janeiro

2010

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Dissertação de Mestrado:

Obtenção e avaliação das propriedades mecânicas e térmicas de compósitos a base de polietileno de alta densidade e fibras de bananeira

Autor: Thiago Santiago Gomes

Orientador: Professora Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
Professora Leila Lea Yuan Visconte

Data da Defesa: 06 de Julho de 2010

Aprovada por:

Professora Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, DSc
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA/UFRJ
Orientador/Presidente da Banca Examinadora

Professora Leila Lea Yuan Visconte, DSc
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA/UFRJ

Professora Mônica Regina da Costa Marques, DSc
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Professor Luciana Portal da Silva , DSc
Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO

Professor Claudia Regina Elias Mansur, DSc
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA/UFRJ

Rio de Janeiro

2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Gomes, Thiago Santiago.

Obtenção e Avaliação das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Compósitos a Base de Polietileno de Alta Densidade e Fibras de Bananeira/Thiago Santiago Gomes – Rio de Janeiro, 2010.

xix, 107f.: il. 30 cm

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA, 2010.

Orientador: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
Leila Lea Yuan Visconte

1. Polietileno de Alta Densidade. 2. Fibra de Bananeira. 3. Compósitos. 4. Fibra de Vidro. 5. Madeira Plástica. I. Pacheco, Elen Beatriz Acordi Vasques (Orient.). II. Visconte, Leila Lea Yuan (Orient.). III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano. IV. Título.

Esta dissertação de Mestrado foi desenvolvida nos Laboratórios do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Dedicada a minha família e amigos por
todo o amor e apoio concedido a mim.

AGRADECIMENTOS

- ❖ Agradeço primeiramente a Deus. Obrigado por toda força e por estar sempre comigo, ajudando-me a superar todos os obstáculos.
- ❖ À minha família: meus pais João e Beatriz; meu irmão Bruno; minhas tias, principalmente a Eliane, Iolanda e Luzanira, tios, primos e primas, meu muito obrigado pela dedicação, pelos sacrifícios, pelo carinho e incentivo.
- ❖ As Professoras Doutoras Elen B. A. V. Pacheco e Leila L.Y. Visconte agradeço-as por sua orientação e apoio, ajudando sempre a explorar meu potencial.
- ❖ As professoras Mônica R. C. Marques, Luciana P. da Silva e Claudia R. E. Mansur, por gentilmente aceitarem o convite para participar da banca e, dessa forma, contribuir com o trabalho realizado.
- ❖ A minha grande amiga Lilian G. Carreira, por ter me auxiliado na execução e elaboração de boa parte das atividades dessa Dissertação, além de me apoiar moralmente nos momentos críticos ao longo desse trabalho.
- ❖ Ao meu grande amigo Elvis A. F. Araújo, que fez inúmeras horas extras para me auxiliar na operação dos equipamentos utilizados ao longo do trabalho, além das suas calorosas discussões técnicas.
- ❖ Aos meus amigos de Instituto que não estão mais na minha equipe, mas que marcaram esse período do Mestrado de forma muito positiva: Ana Luíza, Juliana “Bananinha”, Elaine Vidal, Homero, Marcus, Rodrigo, Renato, Silas, Magnovaldo, Luciana e alguns outros que a memória não me permite lembrar neste momento . Foram momentos importantes e divertidíssimos desde o curso de nivelamento até essa reta final. Fico muito feliz por Deus ter colocado vocês em meu caminho. É um prazer enorme estar com vocês!
- ❖ Ao meu maravilhoso grupo de trabalho do laboratório J-110: Alessandra, Bianca, Juliana, Sandra, Lys, Rogéria, Sr. Carlos, Enio e todos os outros que por algum descuido eu tenha esquecido. A todos vocês, agradeço por primeiramente me

suportarem, estando comigo nos momentos alegres e também nos difíceis, pelo carinho e pelo apoio incondicional!

❖ Aos funcionários e colaboradores do Instituto, principalmente a Sra. Beatriz Chagas, Cristiana Porto, Lea Lopes, Jairo Rocha e Victor Pita meus sinceros agradecimentos.

❖ Ao senhor Wilson e toda a equipe de segurança, por toda sua simpatia e carinho em todas as manhãs!

❖ A quem na minha limitação de memória eu não mencionei nominalmente, mas que de um jeito ou de outro me ajudou neste trabalho, meu muito obrigado!

❖ Ao CNPq, por fomentar financeiramente este trabalho.

“ O senhor é meu pastor, nada me faltará...”

Salmo 23

Resumo da Dissertação apresentada ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (MSc), em Ciência e Tecnologia de Polímeros.

OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DE COMPÓSITOS A BASE DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E FIBRAS DE BANANEIRA

Thiago Santiago Gomes

Orientadoras: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Leila Lea Yuan Visconte

Foram estudados compósitos de polietileno de alta densidade e fibra de bananeira com 10, 20, 30 e 40%*m* de fibra. Misturas com fibra de vidro foram realizadas para comparação dos resultados. Os compósitos foram preparados em extrusora dupla-rosca co-rotacional interpenetrante seguido de moldagem de corpos de prova por injeção. As propriedades mecânicas sob tração, flexão e impacto foram avaliadas, além do grau de cristalinidade dos compósitos por calorimetria diferencial de varredura e as microestruturas dos compósitos por microscopia eletrônica de varredura e microscopia ótica. Também foram avaliadas as propriedades térmicas por meio da análise termogravimétrica. Os estudos microestruturais revelaram a distribuição e dispersão apropriada da fibra nos compósitos, atestando que as condições de processamento adotadas foram adequadas. A incorporação da fibra resultou em aumento do grau de cristalinidade do compósito. Um considerável aumento no grau de reforço mecânico nos compósitos foi atingido pela incorporação da fibra, sendo possível inclusive a substituição da fibra de vidro pela fibra de bananeira em determinados percentuais. A análise termogravimétrica dos compósitos mostrou uma temperatura de início de degradação numa faixa de temperatura intermediária entre a fibra e a matriz polimérica.

Rio de Janeiro

2010

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

DESING AND EVALUATION OF MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON HIGH DENSITY POLYETHYLENE AND BANANA FIBER

Thiago Santiago Gomes

Thesis Supervisor: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Leila Lea Yuan Visconte

Were studied composites of high density polyethylene and banana fiber with 10, 20, 30 and 40% m of fiber. Composite with glass fiber were performed to compare the results. The composites were prepared using an intermeshing co-rotating twin-screw extruder followed by injection process. Mechanical properties of composite, tensile, flexural and impact were evaluated. Thermal analyses of composites were evaluated by differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA). The morphologies of composites were analyzed in a scanning electron microscope (SEM) and optical microscopy. The microstructural studies revealed the distribution and proper dispersion of the fiber in the composites, confirming that the processing conditions adopted were appropriate. The incorporation of fiber resulted in higher degree of crystallinity of the composite. A considerable increase in the degree of mechanical reinforcement in the composites was achieved by the incorporation of banana fiber, and even possible replacement for fiberglass in certain percentages. Thermogravimetric analysis of composites showed an onset temperature of degradation in a range of intermediate temperature between the fiber and the polymer matrix.

Rio de Janeiro

2010

Partes desta Dissertação de Mestrado foram aceitas e apresentadas nos seguintes Congressos:

Plastshow 2010 – V edição – Feira e Congresso – 06 a 09/04/2010 – São Paulo – SP – Brasil.

Título do Trabalho: **Compósitos Poliméricos de Polietileno de Alta Densidade e Fibras de Bananeira**

65º Congresso Anual ABM – 26 a 30/07/2010 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

Título do Trabalho: **Utilização de fibras de bananeira em compósitos poliméricos a base de polietileno de alta densidade**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura química da celulose	5
Figura 2: Estrutura da lignina com seus constituintes aromáticos e alifáticos	6
Figura 3: Imagem da microscopia eletrônica de varredura (SEM) da estrutura de uma fibra de Eucalipto	7
Figura 4: Apresentação típica de uma bananeira	9
Figura 5: Transferência de tensões em função do comprimento da fibra	11
Figura 6: Tipos de distribuição de fibras em compósitos	11
Figura 7: Resistência à tração e módulo de elasticidade de misturas de PP/ 2% MAPP em função do percentual de fibra	13
Figura 8: Resistência à flexão e módulo de flexão de misturas de PP/2% MAPP em função do percentual de fibra	13
Figura 9: (a) Módulo de Young em relação ao percentual de fibra em peso. (b) Resistência à tração em relação ao percentual de fibra em massa de vidro e cânhamo	18
Figura 10: Comparação do valor teórico e experimental do módulo de Young em função da fração volumétrica de fibra de abacaxi	19
Figura 11: Resistência à flexão do compósito HDPE-r/fibra de piaçava em função do percentual de fibra	20
Figura 12: Resistência à tração do compósito HDPE-r/ fibra de piaçava em função do percentual de fibra	21
Figura 13: Resistência à tração dos compósitos (barras escuras) e das fibras (barras claras) de linho (FL), cânhamo (FC), kenaf (FK) e vidro (FV)	22
Figura 14: Análise termogravimétrica (a) do sisal, do PP e do compósito sisal e PP, com 30% de fibra. (b) Comparação entre a fibra não tratada e os tratamentos de PPG/TDI e MAPP	24
Figura 15: Curvas termogravimétricas do compósito com e sem agentes de acoplamento	25
Figura 16: Curvas de perda de massa em função da temperatura. (a) rHDPE, fibra de bagaço de cana, compósito de rHDPE e bagaço de cana. (b) fibra de pinho e compósito de rHDPE/ fibra de pinho	26
Figura 17: Micrografia de compósito r HDPE/ fibra não tratada	27
Figura 18: Micrografia do compósito r HDPE / fibra tratada com silano 85/15	27

Figura 19: Fotomicrografias de SEM da superfície de fratura dos compósitos PP/fibra de coco verde obtidos a 170°C	29
Figura 20: Esquema das tarefas desenvolvidas na Dissertação	30
Figura 21: Lâminas do desfibrador usado para desaglomerar as fibras de bananeira	33
Figura 22: Perfil da rosca da extrusora	38
Figura 23: Corpo de prova do impacto	41
Figura 24: Fração percentual em massa das partículas retidas na peneira <i>versus</i> faixa de tamanho das partículas	47
Figura 25: (a) Fibra de bananeira com ampliação em 2,5 X. (b) Fibra de bananeira com ampliação em 10X	48
Figura 26: Fotografia em microscópio ótico da amostra de fibra de bananeira com ampliação em 20 X	48
Figura 27: Fotografia em microscópio ótico da amostra de fibra de bananeira com ampliação em 40X	49
Figura 28: Gráfico de Pareto para a resposta do Módulo de elasticidade à tração	55
Figura 29: Gráfico de Pareto para a resposta do Módulo de resistência à flexão	55
Figura 30: Curva de calibração do alimentador principal: vazão de alimentação do HDPE em função da velocidade da rosca do alimentador principal	58
Figura 31: Curva de calibração do alimentador lateral: vazão de alimentação da fibra de bananeira em função da velocidade da rosca do alimentador lateral	58
Figura 32: Módulo elástico sob tração do HDPE com fibras de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa	59
Figura 33: Tensão máxima à tração do HDPE com fibra de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa	60
Figura 34: Módulo elástico sob flexão do HDPE com fibras de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa	62
Figura 35: Tensão máxima sob flexão do HDPE com fibra de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa	64
Figura 36: Resistência ao impacto do HDPE com fibra de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa	65
Figura 37: (a) Compósito com 20% em massa de fibra de bananeira; (b) compósito com 40% em massa de fibra de bananeira	68

Figura 38: (a) Compósito com 20% de fibra; (b) compósito com 40 % de fibra e massa	69
Figura 39: Fotomicrografia do compósito HDPE/ fibra de bananeira na proporção 80/20 % m/m com fibra em diferentes formas e disposição: (a) forma cilíndrica da fibra de bananeira; (b) fibras dispostas no sentido paralelo ao fluxo de injeção	69
Figura 40: Compósito HDPE/ fibra de bananeira na proporção 60/40 % m/m: (a) Microfibrilas da fibra de bananeira; (b) poros aparentemente preenchidos com HDPE da matriz	70
Figura 41: Seção transversal do lúmem (a) cilíndrico; (b) triangular	70
Figura 42: Curva termogravimétrica da fibra de bananeira em presença de N ₂	72
Figura 43: Curva termogravimétrica do HDPE puro, da fibra de bananeira e do compósito de HDPE com 20 e 40% em massa de fibra de bananeira	73
Figura 44: Derivada da curva termogravimétrica do HDPE puro, da fibra de bananeira e do compósito de HDPE com 20 e 40 % em massa de fibra de bananeira	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Efeito do tamanho da fibra de madeira nas propriedades mecânicas com 50% de fibra	14
Tabela 2: Módulo de tração (E), resistência à tração (σ) e resistência ao impacto do compósito de PP mais fibra natural submetido a diferentes tratamentos (Hidróxido de sódio (NaOH), silano e anidrido maleico (MAPP)) ou não, no percentual de 40% _m de fibra	16
Tabela 3: Propriedades de tração do cânhamo	17
Tabela 4: Informações dadas pelos fornecedores dos materiais utilizados nessa Dissertação	31
Tabela 5: Fatores e níveis utilizados no planejamento fatorial	35
Tabela 6: Planejamento de experimentos para obtenção dos compósitos	35
Tabela 7: Nomenclatura para os compósitos e condições operacionais utilizadas no planejamento de experimentos	36
Tabela 8: Rotação em função da composição extrusada	39
Tabela 9: Comparativo das densidades das fibras naturais	51
Tabela 10: Valores das respostas obtidas nos experimentos	51
Tabela 11: Dados para significado estatístico de resposta do módulo de elasticidade à tração	52
Tabela 12: Dados para significado estatístico de resposta do módulo sob resistência à flexão	53
Tabela 13: Dados para significado estatístico de resposta do módulo de elasticidade somente com fatores relevantes	53
Tabela 14: Dados para significado estatístico de resposta do módulo de resistência à flexão somente com fatores relevantes	54
Tabela 15: Índice de fluidez dos compósitos	66

Tabela 16: Densidade dos compósitos	67
Tabela 17: Temperatura de fusão e cristalização e grau de cristalinidade de HDPE e mistura HDPE/ fibra de bananeira nas proporções 80/20 e 60/40% m/m	76
Tabela 18: Módulo de tração e de flexão obtidos no trabalho e em algumas madeiras plásticas comerciais	77

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS	3
2.1 – OBJETIVO GERAL	3
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 – POLIETILENO: CARACTERÍSTICAS	4
3.2 – FIBRA LIGNOCELULÓSICA	5
3.2.1 – Composição da fibra	5
3.2.2 – Organização estrutural das fibras e fibrilas	7
3.3 – BANANEIRA	8
3.4 – COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRA LIGNOCELULÓSICA	9
3.5 – PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS COM FIBRA LIGNOCELULÓSICA	12
3.5.1 – Propriedades mecânicas	12
3.5.2 – Propriedades térmicas	23
3.5.3 – Propriedades morfológicas	26
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 – MATERIAIS	31
4.2 – EQUIPAMENTOS	31
4.3 – MÉTODOS	32
4.3.1 – Moagem	32
4.3.2 – Secagem das fibras	33
4.3.3 – Obtenção das misturas e definição dos parâmetros	34
4.3.3.1 – Planejamento de experimentos	34
4.3.3.2 – Processamento	36
4.3.3.3 – Moldagem por injeção	39
4.3.4 – Ensaio mecânicos	39
4.3.4.1 – Ensaio de resistência à tração	40
4.3.4.2 – Ensaio de resistência á flexão	40
4.3.4.3 – Ensaio de resistência ao impacto	40
4.3.5 – Outros ensaios	41
4.3.5.1 – Teor de Umidade	41
4.3.5.2 – Densidade	41

4.3.5.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)	43
4.3.5.4 – Microscopia Ótica (OM)	43
4.3.6 – Análise térmica	43
4.3.7 – Calorimetria diferencial de varredura	44
4.3.8 - Determinação do Teor de Lignina	45
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 – CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE BANANEIRA	46
5.1.1 – Determinação da distribuição granulométrica	46
5.1.2 – Avaliação da estrutura da fibra por microscopia ótica	47
5.1.3 – Determinação do teor de lignina	49
5.1.4 – Teor de umidade	50
5.1.4 – Densidade	50
5.2 – AVALIAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO	51
5.2.1 – Definição da matriz de experimentos, fatores e respostas analisados	51
5.2.2 – Análise dos resultados obtidos do planejamento fatorial	52
5.3 – OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS	56
5.4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS	59
5.4.1 – Propriedades sob tração	59
5.4.1.1 – Módulo elástico	59
5.4.1.2 – Tensão máxima sob tração	60
5.4.2 – Propriedades sob flexão	61
5.4.2.1 – Módulo elástico	62
5.4.2.2 – Tensão máxima sob flexão	63
5.4.3 Resistência ao impacto	65
5.5 – ENSAIO FÍSICO	66
5.5.1 – Índice de fluidez	66
5.5.2 – Densidade	67
5.6 – ENSAIO MORFOLÓGICO	68
5.6.1 – Microscopia ótica (mo)	68
5.6.2 – Microscopia eletrônica de varredura (SEM)	69
5.7 – ANÁLISE TÉRMICA	71
5.7.1 – Análise termogravimétrica (TG)	71

5.8 – CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	74
5.9 – COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA PLÁSTICA E DO COMPÓSITO HDPE/ FIBRA DE BANANEIRA	75
6 – CONCLUSÕES	77
7 – SUGESTÕES	78
8 – REFERÊNCIAS	79

1 – INTRODUÇÃO

A história dos plásticos reforçados com fibras naturais teve início no século XX e desde então estes materiais tem movimentado bilhões de dólares no mundo (JOHN, 2008). A utilização de fibras naturais como reforço tem ganhado a atenção da comunidade científica e das indústrias, como alternativa às fibras inorgânicas, com inúmeras vantagens tais como abundância, biodegradabilidade, baixa massa específica e atoxicidade (ESMERALDO, 2006).

Um grande destaque é dado à utilização de fibras naturais de origem vegetal, em razão da enorme variedade de espécies passíveis de serem pesquisadas, além de sua grande disponibilidade. Diversas fibras vegetais são produzidas em praticamente todos os países e usualmente são designadas como materiais lignocelulósicos. As fibras ocorrem espontaneamente na natureza, sendo que algumas são oriundas de atividade agrícola e há aquelas que são resíduos gerados, principalmente, pela agroindústria (SILVA, 2009). Entre as fibras vegetais mais usadas destacam-se as fibras de sisal, coco, curauá, bambu, *pinus*, bananeira, entre outras (BALZER, 2007).

As bananeiras, principalmente no Brasil, são responsáveis por uma área plantada estimada em 500 mil hectares. É a segunda fruta mais produzida no país (ESPM/SEBRAE, 2007). A fibra da bananeira é retirada das bainhas foliares extraídas do pseudocaule da planta, que equivale ao seu tronco. O corte do pseudocaule, após a retirada do cacho de banana, é uma prática do sistema de cultivo da banana (SBRT, 2010). Sendo assim, o uso do pseudocaule extraído das bananeiras pode se tornar uma fonte alternativa de renda para os agricultores, além de ser uma opção viável para reforço de resinas termoplásticas. Os materiais termoplásticos predominantemente utilizados como matrizes poliméricas para as fibras naturais são polipropileno (PP), poli(cloreto de vinila) (PVC) e polietilenos de alta (HDPE) e de baixa densidades (LDPE) (MALKAPURAM, 2008).

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem de diversos fatores, tais como o tipo, volume, orientação, dispersão da fibra curta na matriz polimérica, bem como a afinidade química entre fibra e matriz (BONELLI, 2005).

Foram observados poucos trabalhos que utilizam a fibra de bananeira como carga em compósitos (BALZER,2007; IBRAHIM 2010; LIU,2009). O Brasil, por ser um grande produtor de banana, poderá utilizar-se de pesquisas acadêmicas com o objetivo de se obter um maior valor agregado a tal fibra, que atualmente é considerado um resíduo da agricultura.

2 - OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é a obtenção de compósitos à base de polietileno de alta densidade (HDPE) e fibra de bananeira com propriedades adequadas à utilização como madeira plástica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para tanto, este trabalho teve como objetivos específicos:

- Caracterizar as fibras de bananeira e, posteriormente, utilizá-las na obtenção dos compósitos.
- Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e morfológicas dos compósitos obtidos à base de fibra de bananeira e comparar com as propriedades mecânicas daqueles à base de fibra de vidro e de madeiras plásticas comerciais.
- Avaliar e determinar as melhores condições de processamento para esse tipo de sistema utilizando a ferramenta de planejamento de experimento.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – POLIETILENO: CARACTERÍSTICAS

Polietileno se caracteriza por apresentar umas das estruturas mais simples de todos os polímeros. É classificado como um termoplástico parcialmente cristalino, que apresenta boa flexibilidade e possui as suas propriedades influenciadas pela relação entre as fases amorfa e cristalina (COUTINHO, 2003).

O fato de apresentar boa processabilidade, baixo custo e excelente balanço de propriedades físicas contribui para que esse material seja bastante comercializado, respondendo por quase um terço da produção mundial de polímeros (OSMA, 2005; HAMID, 1995).

Apesar de manter uma composição química constante, as condições de polimerização influenciam nas suas propriedades físicas e químicas, dando origem a variados tipos de polietileno, sendo diferenciados pelo tipo e grau de ramificação (BRODY, 1997). Dentre os diferentes tipos de polietileno comercialmente explorados, o polietileno de alta densidade (HDPE) é um dos mais importantes (OLIVEIRA, 2007).

O HDPE é preferencialmente linear e altamente cristalino, pois apresenta baixo teor de ramificações. Esse polímero possui temperatura de fusão de aproximadamente 132 °C e sua densidade encontra-se entre 0,95 e 0,97g/cm³. A massa molar numérica média fica na faixa de 50.000 a 250.000 (BILLMEYER, 1984; ODIAN, 1991).

À temperatura ambiente, o HDPE não é solúvel em qualquer solvente, embora alguns, como xileno, por exemplo, provoquem um efeito de inchamento. Sob altas temperaturas, o HDPE dissolve em alguns hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos (OLIVEIRA, 2007).

O HDPE apresenta propriedades mecânicas moderadas e ótima resistência química. Sob elevadas temperaturas, o oxigênio ataca a macromolécula, reduzindo sua massa molar. Sob baixas temperaturas, pode ocorrer degradação foto-oxidativa. O HDPE é ligeiramente permeável a compostos orgânicos, tanto

em fase líquida como gasosa. A permeabilidade à água e gases inorgânicos é baixa (COUTINHO, 2003).

Dada a sua grande versatilidade o HDPE apresenta grandes aplicações na indústria de embalagens, dentre as quais se destaca: embalagens de leite, café, sucos e filmes flexíveis para alimentos (OLIVEIRA, 2007).

3.2 – FIBRA LIGNOCELULÓSICA

3.2.1 Composição da fibra

Durante a produção de biomassa, no processo de fotossíntese, ocorrem reações para a formação dos componentes das fibras vegetais, tais como a celulose e a hemicelulose, que consistem de vários carboidratos polimerizados (YU, 2008). Junto com a lignina, esses três elementos são considerados os principais componentes das fibras vegetais (ARAÚJO, 2008).

Essa composição química irá variar de acordo com a idade das fibras e as condições climáticas a que a planta foi submetida. Dentre os três principais componentes, a celulose é o polímero existente em maior abundância na natureza, possui fortes ligações hidrogênio, sendo altamente hidrofílica (SANTOS, 2002). Sua estrutura química é apresentada na Figura 1.

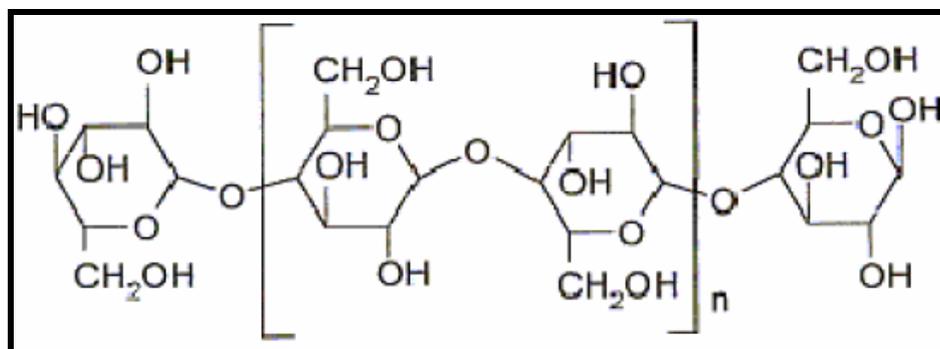


Figura 1. Estrutura química da celulose (Santos, 2002)

As hemiceluloses promovem a flexibilidade das plantas e são os agentes de ligação entre a celulose e a lignina. São uma mistura de polissacarídeos de cadeia ramificada e baixa massa molar, os quais são intimamente associados com a celulose nos tecidos das plantas (RAZERA, 2006).

A lignina, após a celulose, é o material orgânico de origem vegetal mais abundante, fornecendo a rigidez e dureza às mesmas. A lignina apresenta uma estrutura polimérica amorfa (Figura 2). É altamente aromática, insolúvel em solventes não reativos e não possui um modelo estrutural regular, característico dos polímeros em geral (FENGEL; WEGENER, 1989; SANTOS, 2002).

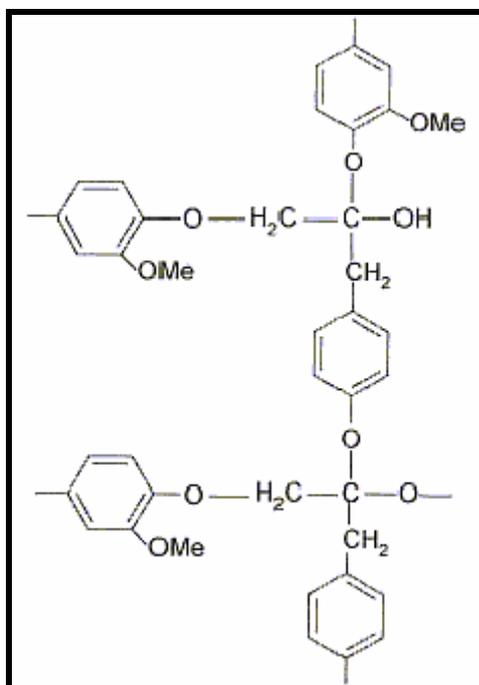


Figura 2. Estrutura da lignina com seus constituintes aromáticos e alifáticos (SANTOS, 2002)

A lignina tem sido utilizada como agente compatibilizante entre fibras de coco e matrizes poliméricas apolares como o polietileno, devido à presença de grupos polares e apolares na sua molécula (GEETHAMMA, 2005; ROZMAN, 2000).

Além destes componentes citados, são encontrados compostos inorgânicos e moléculas extraíveis com solventes orgânicos, como pectinas, carboidratos simples, terpenos, alcalóides, saponinas, polifenólicos, gomas, resinas, gorduras e graxas, entre outros (ARAÚJO, 2008; MOHAN, 2006).

3.2.2 Organização estrutural das fibras e fibrilas

A organização estrutural mais usual de uma fibra vegetal está representada na Figura 3.

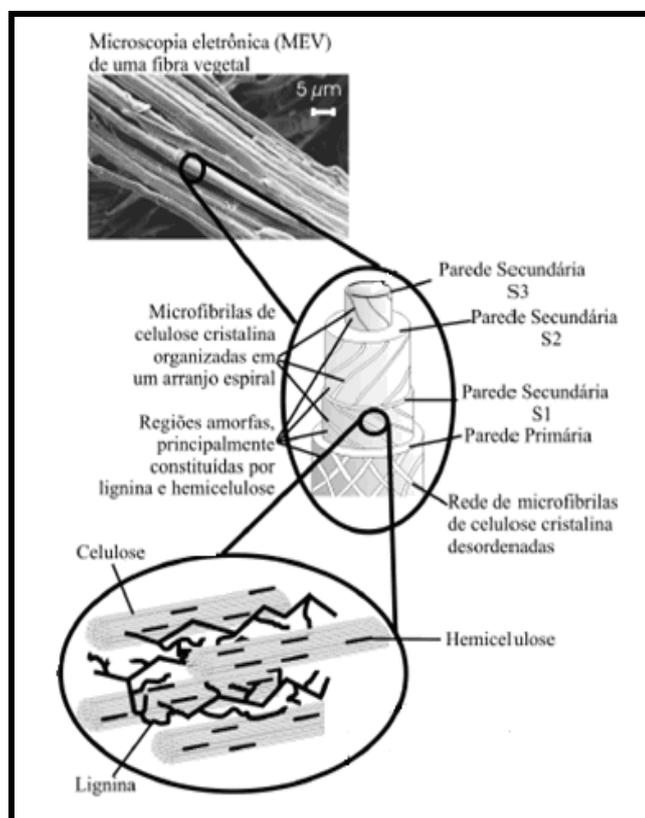


Figura 3. Imagem da microscopia eletrônica de varredura (SEM) da estrutura de uma fibra de Eucalipto (SILVA, 2009)

É possível observar que a fibra lignocelulósica é formada por um conjunto de fibrilas que possuem uma estrutura de camadas complexas, constituída por uma parede primária, inicialmente depositada durante o crescimento das células, que circunda uma parede secundária. A parede secundária é constituída por três camadas (S1, S2 e S3), na qual a camada intermediária (S2) determina as propriedades mecânicas da fibra e consiste em uma série de microfibrilas helicoidalmente formadas por longas cadeias de celulose e organizadas no sentido da fibra. Tais microfibrilas têm o diâmetro de 10 a 30 nm e são resultantes do empacotamento de 30 a 100 cadeias de celulose estendidas (PIETAK, 2007; REN, 2008).

3.3 BANANEIRA

O Brasil se destaca na produção de bananeira como o segundo maior produtor mundial desse fruto, ficando atrás somente da Índia. A produção brasileira estimada de 2005 foi de 6,3 milhões de toneladas, o que corresponde a 9,3% da produção mundial (ESPM/SEBRAE, 2007). Do ponto de vista social e econômico, estima-se que cada hectare fruticultor cultivado gere entre 2 e 5 trabalhadores, o que criaria 5 milhões de postos de trabalho (FERNANDES, 2004).

A cultura da banana está presente ao longo de todo o território nacional, participando com significativa importância na economia de diversos estados brasileiros como: Pará, São Paulo, Bahia, Amazonas, Minas Gerais, e Santa Catarina (IBGE, 1998).

Seu gênero é classificado como *Musa*, da família *Musaceae*, a qual engloba mais de 30 espécies distintas e pelo menos 100 subespécies. O seu gênero é dividido em dois grupos principais chamados *samusa* e *physicals*. Sua resistência à tração e módulo de elasticidade são bem próximos aos valores da fibra de sisal, considerada uma das mais resistentes entre as fibras naturais (SILVA, 2004).

O pé de bananeira corresponde a uma planta herbácea alta (cerca de 2 – 7 m), composta de fortes e longas folhas sobrepostas umas as outras, formando um pseudo-caule. As fibras de bananeira são extraídas normalmente do pseudo-caule da bananeira (Figura 4), ou seja, das folhas que formam o "tronco" da planta (POTHAN, 2003).

O pseudocaule é uma estirpe ou "tronco" em formato de um cilindro irregular, formado por bainhas foliares sobrepostas, tendo em seu interior o "palmito" ou coração central. No prolongamento das bainhas foliares encontram-se as folhas (SOTO BALESTERO, 1992).

Na atividade bananicultora, após a colheita da fruta, o cacho é conduzido para outros locais e as outras partes da planta permanecem no bananal. A planta entra em senescência e morre, encerrando o ciclo vegetativo, tornando-se resto de cultura ou resíduo agrícola (SOFFNER, 2001).

De acordo com Hiroce (1972), após a colheita da fruta, a atividade bananicultora pode gerar em matéria seca, para o grupo Cavendishii: 8 t/ha de pseudocaule, 4,7 t/ha de folha; 0,7 t/ha de engaço e 0,3 t/ha de botão floral ou coração.

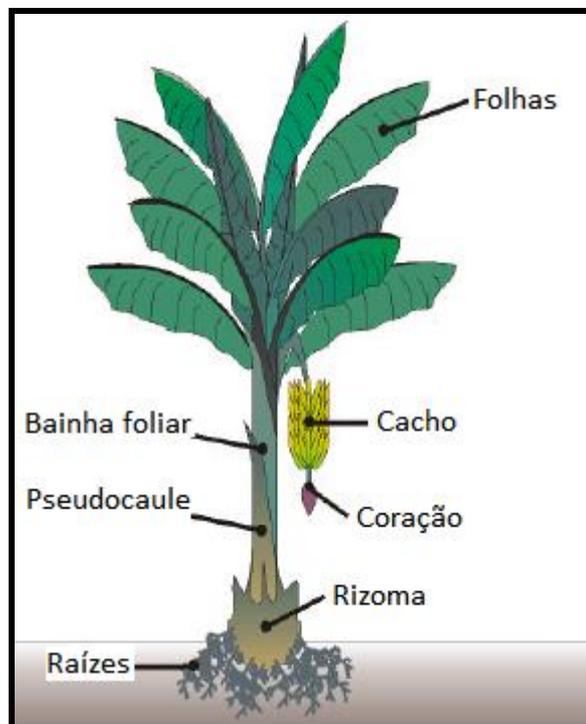


Figura 4. Apresentação típica de uma bananeira (RAZERA, 2001)

3.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRA LIGNOCELULÓSICA

Compósito é definido por Mano (2003), como um material conjugado formado por pelo menos dois componentes, sendo geralmente uma fase polimérica denominada matriz polimérica e uma fase de reforço, normalmente na forma de fibras. O desempenho e as propriedades dos compósitos dependem das propriedades individuais de seus componentes e de suas compatibilidades interfaciais (GARBASSI, 1996).

Sendo assim, o que se objetiva ao utilizar compósitos reforçados por fibras é que ambos os componentes conservem suas identidades químicas e físicas e, ainda, produzam uma combinação de propriedades que não podem ser obtidas utilizando somente um dos constituintes isolados. Em geral, as fibras são os principais membros de transporte de cargas, enquanto a matriz as mantém na

localização e direção desejada, agindo como um transportador médio de carga e protegendo as fibras de danos (MALLICK, 1988).

As propriedades mecânicas desse tipo de compósito estão relacionadas a três fatores principais:

- Módulo de resistência da fibra.
- Estabilidade química da matriz polimérica.
- Ligação efetiva entre matriz e reforço na transferência de forças através da interface.

Além desses fatores, existem os parâmetros microestruturais como o diâmetro, comprimento, fração volumétrica, orientação e modo de dispersão da fibra que influem nas propriedades finais do compósito (RAZERA, 2001).

Um dos fatores microestruturais que governa as propriedades dos compósitos é o modo de dispersão das fibras no mesmo. A mistura de fibra polar e higroscópica com uma matriz apolar e hidrofóbica pode resultar em dificuldade de dispersão da fibra na matriz. Agrupamentos e aglomerações de fibras impossibilitam a produção de compósitos com boas propriedades (ROWELL, 1997).

A eficiência de um compósito também depende da transferência de forças entre a fibra e matriz, conforme já mencionado. Isto pode ser melhorado otimizando a interação e adesão entre as duas fases ou também pelo aumento do comprimento da fibra no compósito (JOSEPH, 2002).

A descontinuidade da fibra natural, quando usada como reforço, exerce uma forte influência na resistência à tensão e tenacidade nos compósitos. Fatores como comprimento e orientação das fibras são determinantes na melhoria das propriedades dos mesmos. Um exemplo é a resistência à tração de compósitos com fibras descontínuas que é menor, quando comparado a compósitos com fibras contínuas (ZÁRATE, 2000).

Existe um comprimento crítico da fibra, a partir do qual a resistência do material tende a aumentar. Quando o comprimento das fibras é menor que o crítico, as

fibras não oferecem reforço e a cisão do compósito é causada pela quebra na interface e não pela quebra das fibras (RABELLO, 2000). De acordo com a Figura 5, as fibras podem suportar até uma tensão máxima transferida da matriz, sua própria resistência à tração, que ocorre a partir do comprimento crítico da fibra (L_c).

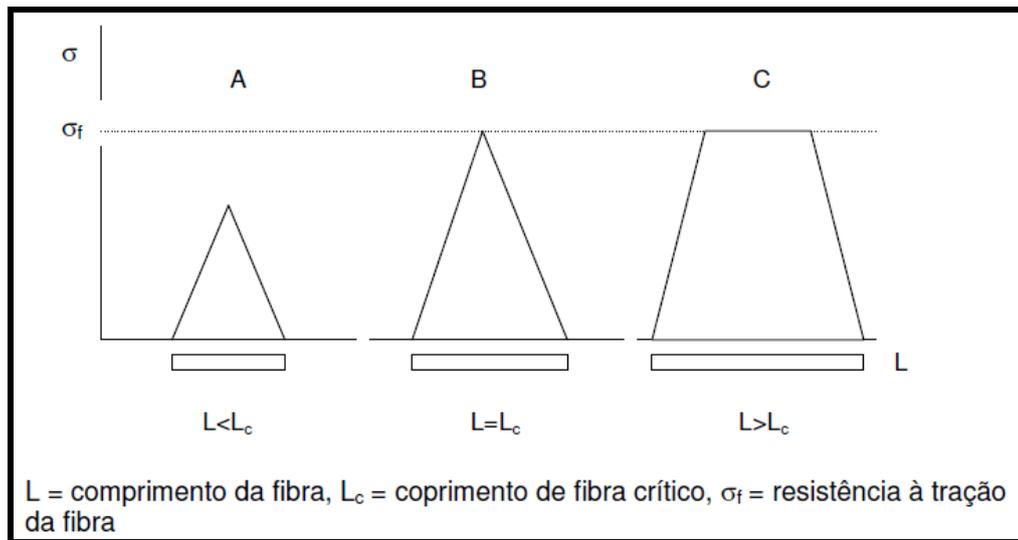


Figura 5. Exemplos de comprimento da fibra: A) abaixo do valor crítico, B) comprimento crítico, C) fibra com maior comprimento que o valor crítico (RABELLO, 2000)

Quanto à orientação das fibras em compósitos elas podem ser: unidirecionais com fibras contínuas; aleatória com fibras descontínuas e multidirecionais e orientada de fibras descontínuas e unidirecionais, conforme esquema mostrado na Figura 6 (MATTHEWS, 1994).

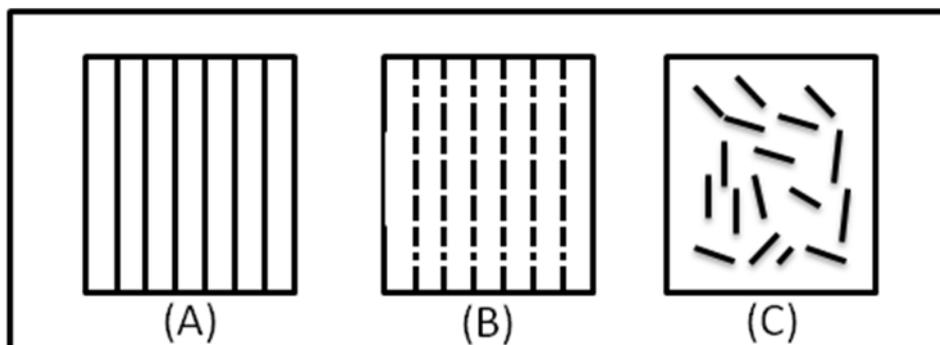


Figura 6. Tipos de distribuição de fibras em compósitos (a) fibras contínuas e unidirecionais, (b) fibras descontínuas e unidirecionais, (c) fibras descontínuas e aleatórias (MATTHEWS, 1994).

3.5 PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS COM FIBRA LIGNOCELULÓSICA

O presente item tem por finalidade apresentar os principais resultados de propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas obtidas na literatura científica com a utilização de compósitos poliméricos e fibras naturais diversas.

3.5.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais poliméricos são de grande interesse científico e tecnológico, devido aos requisitos e (ou) exigências que os diversos polímeros e compósitos poliméricos devem atender. Valores de propriedades mecânicas tais como resistência à tensão e módulo de elasticidade podem servir como base para a comparação de desempenho mecânico para diferentes materiais, bem como avaliar o efeito de diferentes tratamentos aplicados no processamento desse tipo de material (CANEVAROLO, 2002).

Os resultados de ensaios de resistência mecânica sobre esforços de tração, flexão e compressão são obtidos como curvas do tipo tensão *versus* deformação. Os ensaios são realizados por meio da aplicação de uma solicitação ao material sob condições controladas, até a ruptura do material ou até que a tensão deformação alcance um valor pré-definido. Durante esse ensaio, a carga ou tensão ao qual o material é submetido e a deformação a ele imposta são registrados (CANEVAROLO, 2002).

As propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas dos compósitos poliméricos lignocelulósicos serão discutidas a seguir de acordo com o tipo de carga usada, como exemplo fibra de madeira, cânhamo, fibra de abacaxi, de piaçava, de sisal, curauá, bagaço de cana e outras.

Fibra de Madeira

Xue e colaboradores (2007) prepararam uma mistura de PP e fibra de madeira com 1 cm de comprimento e 6 a 9% de umidade, nos percentuais de 30, 40, 50 e 60% em função da massa, utilizando o processo de injeção para gerar uma orientação da fibra de madeira. Para melhorar a adesão interfacial entre a fibra e

a matriz, o autor utilizou 2% em massa de PP graftizado com anidrido maleico (MAPP).

Nas Figuras 7 e 8 é possível observar que tanto o módulo de elasticidade quanto o módulo de flexão e a resistência a flexão aumentaram com o aumento do percentual de fibra no compósito. A resistência à tração diminuiu. As propriedades de resistência à tração e flexão demonstraram uma melhora com o uso do agente de acoplamento, sendo esse fato justificado pela adesão (interação) interfacial entre a fibra de madeira e a matriz polimérica.

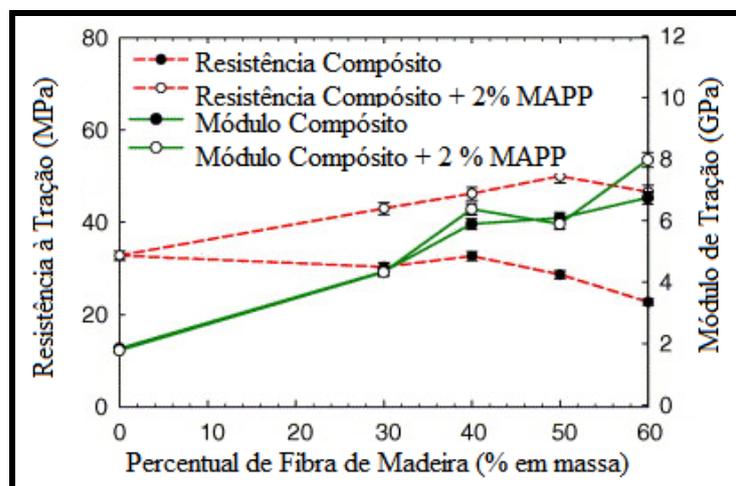


Figura 7. Resistência à tração e módulo de elasticidade de misturas de PP/2% MAPP em função do percentual de fibra de madeira (XUE, 2007)

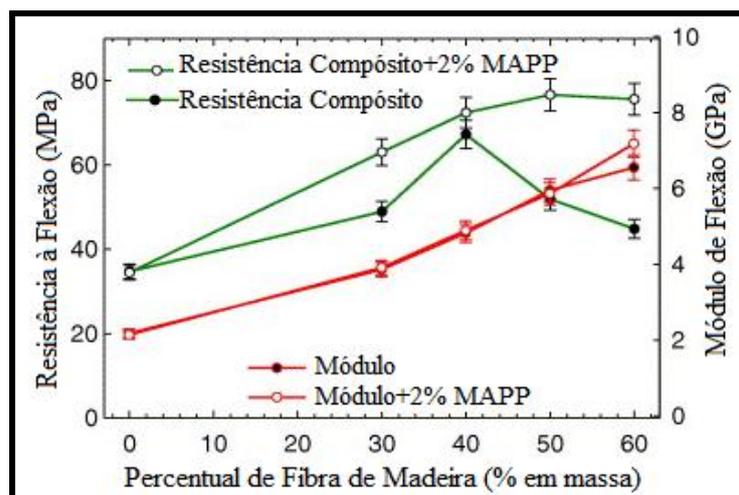


Figura 8. Resistência à flexão e módulo sob flexão de misturas de PP/2% MAPP em função do percentual de fibra em função do percentual de fibra de madeira (XUE, 2007)

Yuan e colaboradores (2008) prepararam compósitos com diferentes tamanhos de fibra de madeira de carvalho (125, 180 e 250 μm) com a finalidade de avaliar a influência do tamanho da fibra nos compósitos de poliolefinas (PP e HDPE). Foi utilizada a técnica de extrusão com dupla rosca seguida do processo de injeção para a mistura do material e obtenção dos corpos de prova, respectivamente. Os autores utilizaram PP e HDPE com anidrido maleico (MAPP e MAPE, respectivamente) como agente de acoplamento para melhorar a adesão interfacial entre os componentes. Conforme mostrado na Tabela 1, é possível observar que houve um ganho nas propriedades do compósito com o aumento do tamanho da fibra, passando de 125 para 180 μm , porém, logo após esse aumento, de 180 para 250 μm ocorreu um decréscimo.

Tabela 1. Efeito do tamanho da fibra de madeira nas propriedades mecânicas com 50% de fibra (PAN, 2008)

Tamanho da fibra de madeira (μm)	Agente de acoplamento (% em massa)	Módulo sob Flexão (MPa)	Módulo sob Tração (MPa)	Tração na ruptura (MPa)	Resistência ao impacto (J/m)
Polietileno de alta densidade					
125	-	2950 \pm 115	3905 \pm 228	14,9 \pm 0,1	23,0 \pm 0,5
180	-	3036 \pm 124	4064 \pm 203	14,2 \pm 0,1	25,9 \pm 0,7
250	-	2436 \pm 125	3003 \pm 180	12,5 \pm 0,1	34,5 \pm 1,2
125	MAPE - 3	3052 \pm 180	4334 \pm 96	29,2 \pm 0,1	41,8 \pm 0,7
180	MAPE - 3	3183 \pm 156	4413 \pm 113	28,7 \pm 0,1	42,6 \pm 1,2
250	MAPE - 3	2458 \pm 127	3724 \pm 205	24,0 \pm 0,1	43,5 \pm 1,1
Polipropileno					
125	MAPP - 3	4018 \pm 53	5234 \pm 130	32,6 \pm 0,1	20,6 \pm 0,4
180	MAPP - 3	3865 \pm 126	5140 \pm 146	31,2 \pm 0,2	21,8 \pm 0,6
250	MAPP - 3	3191 \pm 113	4718 \pm 268	26,0 \pm 0,3	23,3 \pm 1,9

Segundo Pan e colaboradores (2008), as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com uma fibra sintética curta dependem da razão de aspecto da fibra (comprimento da fibra/diâmetro). Fibras longas têm melhor efeito de reforço para compósitos poliméricos. No entanto, a fibra de madeira, ao contrário da fibra de vidro ou fibra de carbono, contém uma grande quantidade de vazios e fissuras, que geram pontos de fragilização na peça obtida, como já observado na Figura 3.

Yuan e colaboradores (2008) verificaram que com o aumento do comprimento da fibra de madeira, tornou-se mais difícil para as moléculas de polímero penetrar totalmente nas fissuras e espaços vazios da fibra de madeira. Sendo assim, os autores concluíram que os compósitos de madeira e poliolefina apresentaram uma maior quantidade de espaços vazios remanescentes nos compósitos com fibras de madeira mais longa, o que acarretou uma perda nas propriedades de resistência à tração e módulo de tração e flexão. A presença desses espaços vazios ao longo do compósito de fibra de madeira foi avaliada através da medição da densidade. Os autores compararam a densidade inicial da fibra e do polímero com a densidade final do compósito.

A diferença após o processamento foi considerada pelos autores como a quantidade de polímero que havia penetrado na fibra. A resistência ao impacto dos compósitos sem agente de acoplamento melhorou com a presença de fibras de comprimentos maiores, uma vez que o mecanismo de fratura do compósito baseou-se no arrancamento da fibra (*pull-out*). Sendo assim, quanto mais comprida a fibra mais energia é necessária para arrancá-la. (YUAN, 2008).

Ichazo e colaboradores (2001) prepararam compósitos de PP e fibra de madeira, utilizando alguns tratamentos nas fibras naturais para avaliar as modificações nas propriedades. O primeiro tratamento (tratamento alcalino) foi feito com uma solução de 18% v de hidróxido de sódio, no qual as fibras ficaram imersas durante 30 e 60 minutos. Outro tratamento realizado foi o tratamento por silano, no qual uma solução contendo o vinil-tris(2-metoxietoxi)-silano ficou em contato com a fibra sob agitação. Além desses tratamentos, foi utilizado o MAPP como agente de acoplamento.

Foram preparados diferentes compósitos em um extrusora co-rotante interpenetrante de PP com 10, 20, 30, 40 e 50% em massa de fibra. A partir da observação dos melhores resultados dessas composições, foram preparados compósitos com as fibras tratadas pelos dois métodos abordados e adicionados os dois tipos diferentes de PP graftizado com anidrido maléico (MAPP), chamados

Polybond 3150 e 3200, diferindo basicamente a viscosidade de um para o outro, sendo o Polybond 3200 aquele que apresenta menor viscosidade.

Os autores observaram que a composição em 40% em massa de fibra apresentou as melhores propriedades mecânicas, sendo assim, foi utilizado esse percentual para efeitos comparativos. A Tabela 2 mostra um ganho de propriedade de tração com o uso dos tratamentos propostos.

Tabela 2. Módulo sob tração, tração na ruptura e resistência ao impacto do compósito de PP e fibra natural submetida a diferentes tratamentos com hidróxido de sódio (NaOH), silano e anidrido maleico (MAPP) ou não, no percentual de 40%*m* de fibra

Material	Módulo sob tração (MPa)	Tração na ruptura (MPa)	Resistência ao impacto (J/m)
PP	1448	25	26
PP/ Fibra de madeira não tratada	3016	37	15
PP/ Fibra tratada com NaOH (1/2 h)	3211	38	15
PP/ Fibra tratada com NaOH (1 h)	3125	38	16
PP/ Fibra tratada com silano	3177	36	12
PP/ Fibra/ MAPP 1 (POLYBOND 3150)	3270	39	13
PP/ Fibra/ MAPP 2 (POLYBOND3200)	3010	43	11

Apesar da melhora nas propriedades de tração, os autores comentam uma inesperada redução da resistência ao impacto. No caso do tratamento com silano, os autores justificam esse comportamento devido ao crescimento excessivo das cadeias de siloxano, que formaram ligações cruzadas entre si e enfraqueceram a interface entre a fibra e a matriz polimérica. As cadeias de siloxano deveriam reagir com as hidroxilas da fibra, formando ligações hidrogênio e melhorando essa interface, porém isso não ocorreu (ICHAZO, 2001)

Cânhamo

Mutjé e colaboradores (2007), visando produzir um material à base de polipropileno (PP) com cânhamo (*Cannabis sativa*) com propriedades próximas ao compósito de fibra de vidro, avaliaram a influência do percentual de fibra natural e o uso de agente de acoplamento. Os autores processaram o material em um

misturador de rolos em temperatura acima da fusão do PP. Prepararam compósitos contendo fibra de cânhamo nos percentuais de 20, 30 e 40% em massa e anidrido maleico, como agente de acoplamento, nos percentuais de 2, 4, 6 e 8% em massa. Após o processo de mistura o material foi injetado para se obter os corpos de prova. A Tabela 3 mostrou um ganho de propriedade com o aumento do percentual da fibra.

Tabela 3. Resistência a tração máxima e módulo de Young da fibra de cânhamo

Percentual de fibra (%)	MAPP (%)	Tração Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)
0	0	27,56	1135
20	0	29,51	2133
20	2	30,73	2052
20	4	33,32	2143
20	6	34,68	2146
20	8	36,25	2162
30	0	32,86	2618
30	2	37,21	2658
30	4	43,43	2605
30	6	42,36	2598
30	8	39,80	2627
40	0	32,84	3498
40	2	44,08	3491
40	4	48,81	3504
40	6	48,68	3470
40	8	46,20	3554

Os autores advertem que esse aumento não está relacionado com uma afinidade entre os componentes. Como discutido ao longo do trabalho, poliolefinas hidrofóbicas e fibras naturais hidrofílicas não possuem afinidade, sendo proposto pelos autores uma possível ancoragem mecânica da fibra na matriz. O uso de agente de acoplamento (MAPP) provocou uma pequena melhora nas propriedades de tração, porém os autores afirmam não ser significativo esse ganho de propriedades.

Ao comparar os resultados do uso da fibra de vidro com os da fibra de cânhamo, verifica-se que apesar do compósito com fibra de cânhamo não possuir os mesmos valores de tração na ruptura, nota-se que o uso de percentuais maiores de fibra de cânhamo conduz a valores compatíveis com os de fibra de vidro. O

uso de maiores quantidades de fibra natural compensa a diferença ou aproxima-se do valor obtido pela fibra de vidro, conforme ilustra a Figura 9 (a) e (b), respectivamente.

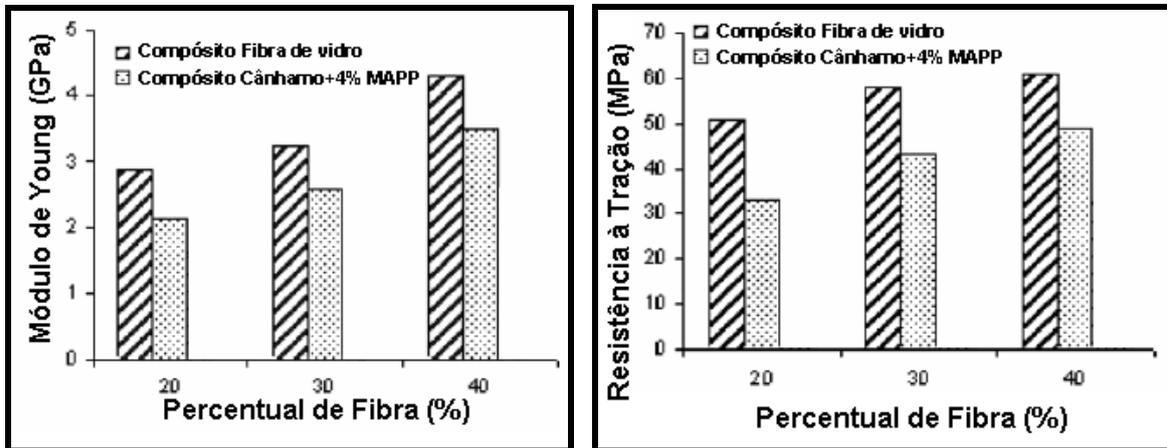


Figura 9. Propriedades mecânicas em função da quantidade de fibras de misturas de PP e fibra de vidro ou PP e fibra de cânhamo/4% m MAPP: (a) Módulo de Young (b) Tração máxima

Fibra de abacaxi

Arib e colaboradores (2006) desenvolveram um compósito de polipropileno e fibra da folha de abacaxi por meio da técnica de sanduíche, a qual consiste em dispor uma camada de fibra no centro do compósito, envolvida por outras duas camadas de polímero. Neste trabalho, os autores variaram o percentual de fibra de abacaxi (2,7, 5,4, 10,8 e 16,2% v) e compararam os valores obtidos com o valor do módulo Young teórico que foi calculado pela Equação 1.

$$E_c = E_f V_f + V_m E_m \quad \text{Equação 1}$$

Nesta equação, o E_c representa o módulo de Young teórico do compósito, o E_f o módulo de Young da fibra, E_m o módulo de Young da matriz, V_f e V_m representam o volume de fibra e de matriz no compósito, respectivamente.

A Figura 10 mostra a influência da fração volumétrica da fibra da folha do abacaxi sobre o módulo, sendo observado um ganho em módulo de 29,4 % quando a fração volumétrica de fibra foi 10,8% v. Valores acima desse percentual

demonstraram um decréscimo na propriedade, como na fração de 16,2% v, que levou a uma diminuição de módulo em relação ao valor máximo.

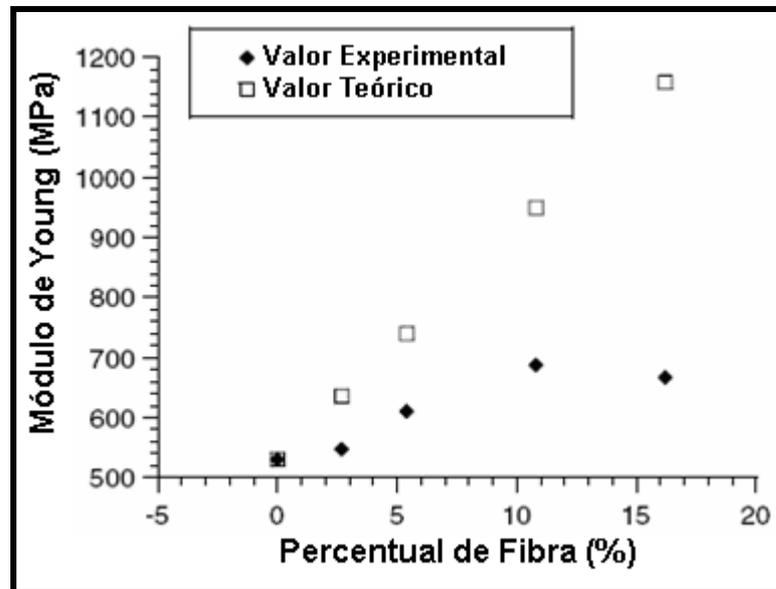


Figura 10. Comparação do valor teórico e experimental do módulo de Young em função da fração volumétrica de fibra de abacaxi no PP (ARIB, 2006)

Esse decréscimo nas propriedades, em relação ao módulo teórico, foi relacionado pelos autores a possíveis falhas geradas pela fibra, principalmente em maiores proporções. Se comparado o valor teórico obtido com o experimental, nota-se uma grande discrepância nesses resultados. Essa diferença de valores foi justificada pelos autores por problemas na distribuição da fibra, além de uma baixa transferência de esforço da matriz para a fibra, caracterizando uma baixa adesão interfacial.

Fibra de Piaçava

Bonelli e colaboradores (2005) avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado (HDPE-r) e fibra de piaçava da Amazônia (*Leopoldinia piassaba*), tratada e não-tratada, em diferentes proporções (5, 10 e 15% m de fibra). As fibras foram submetidas a tratamento superficial com silano de duas formas: impregnação direta (fibra-tratamento com silano (ts)) e com solução metanólica (fibra-tratamento com solução metanólica (tms)). Para efeito de comparação foi utilizada uma mistura com a fibra não

tratada (fibra-nt). A mistura fibra/HDPE-r foi realizada em câmara de mistura, com posterior prensagem para a obtenção dos corpos de prova.

A Figura 11 apresenta o efeito da quantidade de fibras tratadas e não-tratadas na resistência à flexão em 5% de deformação do compósito HDPE reciclado/fibra de piaçava. A adição de fibra não-tratada à matriz polimérica não ocasionou aumento na resistência à flexão. Comportamento semelhante foi observado na incorporação de fibra tratada com solução metanólica de silano, devido a uma provável extração da fração lignânica da fibra pelo metanol (LI, 2007).

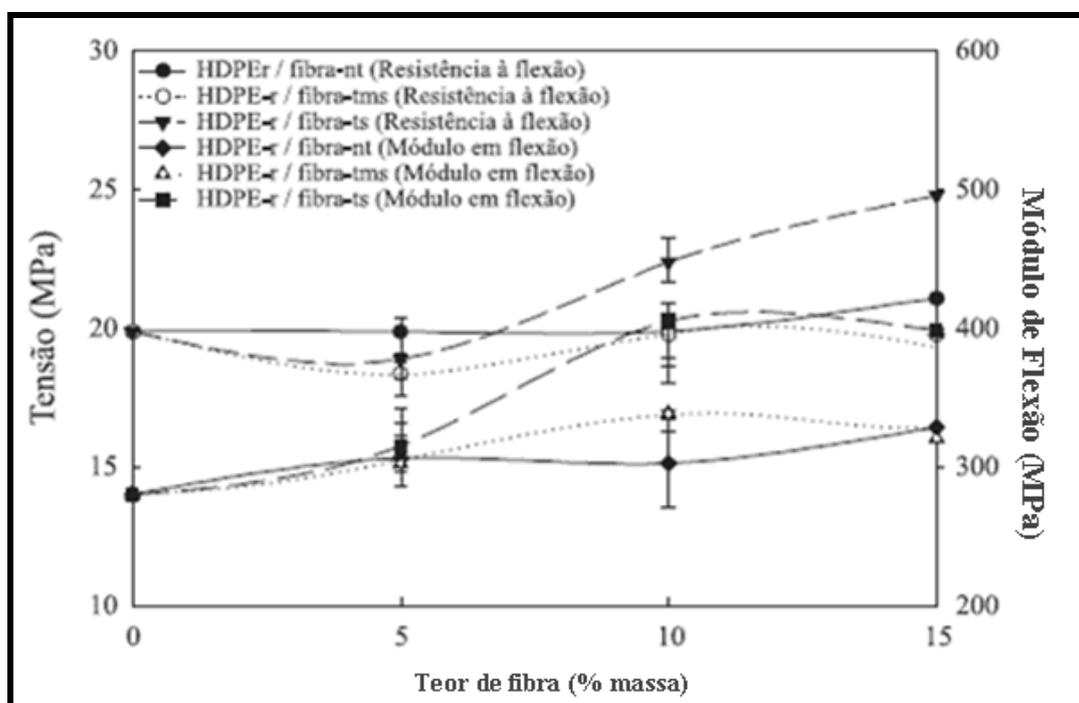


Figura 11. Resistência à flexão em 5% m de deformação do compósito HDPE-r/fibra de piaçava em função do percentual de fibra (BONELLI, 2005)

Esta fração lignânica é responsável, possivelmente, pelo aumento do reforço estrutural da fibra, assim como pela melhor interação entre o agente de acoplamento e a mesma (SAIN, 2005). A utilização de fibra tratada diretamente com silano promoveu um aumento na resistência à flexão do compósito, em especial no composto com 15% m de fibra. Os compósitos confeccionados com fibra tratada com silano apresentaram-se mais duros e resistentes à flexão com 5% de deformação que os demais, conforme esperado, uma vez que ocorreu provavelmente um aumento de adesão interfacial entre fibra e matriz.

Vale ressaltar que as fibras de piaçava exibiam comprimento de 1–4 mm antes da mistura com o polímero. Durante o processamento, as fibras são em geral quebradas em fragmentos menores, o que as torna muito curtas para o uso como reforço. Uma vez que o comprimento crítico da fibra depende da transferência de esforço entre a matriz e a fibra, uma forma de superar esse problema é o aumento da adesão interfacial entre as fibras e o polímero (MAGNUS, 2007).

A Figura 12 mostra o efeito da percentagem de fibras tratadas e não-tratadas na resistência à tração de HDPE reciclado. A adição de fibra não-tratada não só reduziu significativamente a tensão na ruptura assim como não alterou o módulo de elasticidade do HDPE-r. A fragilidade do material é provavelmente explicada pela concentração de tensões na interface entre fibra e matriz.

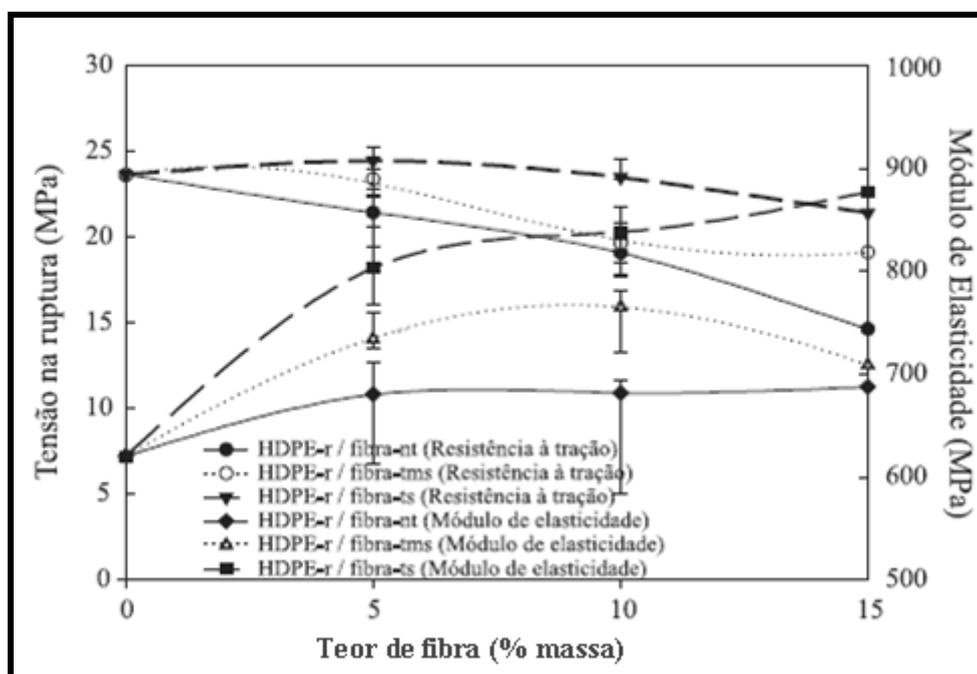


Figura 12. Tensão na ruptura e módulo de elasticidade do compósito HDPE-r/fibra de piaçava em função do percentual de fibra (BONELLI, 2005)

A adição de fibra tratada com solução metanólica de silano aumentou em pequena proporção o módulo de elasticidade do polímero, com redução da tensão na ruptura. A fibra tratada apenas com silano apresentou os melhores resultados quanto à tensão na ruptura e o módulo de elasticidade, corroborando o comportamento observado nos ensaios de flexão.

Outras Fibras

Mueller e Krobjilowski (2003) compararam diferentes fibras naturais com polipropileno, utilizando uma estrutura de sanduíche, onde as fibras foram dispostas de forma aleatória, não havendo trançamento dessas fibras, para a confecção do compósito. Os autores utilizaram nessa comparação a fibra de linho (*Linum usitatissimum*) (FL), cânhamo (*Cannabis sativa*) (FC), kenaf (*Hibiscus cannabinus*) (FK) e fibra de vidro (FV), sendo essa última somente para efeito comparativo da possibilidade de substituição das fibras naturais por essa fibra sintética. Na Figura 13 é possível observar o resultado obtido. As barras brancas representam os resultados da fibra pura, sem a mistura no compósito e as barras em cinza, as fibras no compósito com PP. O PP puro está representado pela barra em preto.

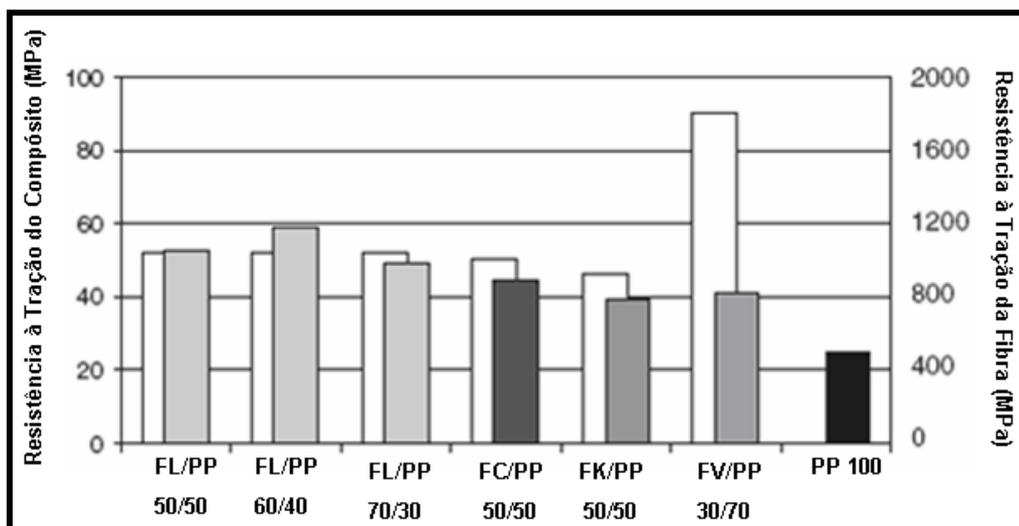


Figura 13. Resistência à tração dos compósitos (barras escuras) e das fibras (barras claras) de linho (FL), cânhamo (FC), kenaf (FK) e vidro (FV) (MUELLER, KROBJILOWSKI; 2003)

Como é possível se observar do gráfico, a fibra de vidro possui a maior resistência à tração do que todas as outras fibras, porém, quando utilizada no compósito com PP, nota-se que os outros materiais se apresentam como uma alternativa viável para a substituição da fibra de vidro.

Além desta observação, os autores atribuem a maior resistência à tração da fibra de linho à morfologia dessa fibra, pois ela possui uma maior espessura de poro

além de uma distribuição de diâmetro mais uniforme em comparação com o cânhamo ou kenaf. Uma maior espessura dos poros da fibra deve resultar em uma melhor penetração do plástico durante o processo de compressão e, portanto, um compósito com melhores propriedades mecânicas.

3.5.2 Propriedades térmicas

A análise térmica é definida como um grupo de técnicas que permite avaliar uma propriedade física de uma substância em função da temperatura, enquanto esse material é submetido a uma programação controlada de temperatura e sob uma atmosfera específica. Segundo Canevarolo (2002), essa definição implica em três critérios: uma propriedade física deve ser medida, a medida deve ser expressa em função da temperatura e a medição deve ocorrer sob um programa controlado de temperatura.

A determinação precisa das propriedades térmicas de um polímero é fundamental em muitos processos e projetos de engenharia. Em processamento é fundamental o bom conhecimento das propriedades térmicas para a obtenção de um ciclo de processamento mais rápido e com a menor degradação possível do compósito com fibra natural (CANEVAROLO, 2002).

Fibra de Sisal

Joseph e colaboradores (2003) realizaram modificações químicas na fibra de sisal (*Agave sisalana*) utilizando um derivado de uretano e polipropileno glicol (PPG/TDI), o polipropileno modificado com anidrido maleico (MAPP) e o permanganato de potássio (KMnO_4) com a intenção de melhorar a adesão interfacial entre a fibra e a matriz.

A mistura das fibras com o PP se deu em uma câmara de mistura e os percentuais da fibra se mantiveram em 20 % em massa para todos os compósitos com fibra tratada. As amostras foram submetidas a uma análise termogravimétrica (TG) com a finalidade de se observar a estabilidade térmica desses compósitos com a fibra natural.

A Figura 14 (a) mostra as curvas de degradação térmica do PP, da fibra de sisal e do compósito PP e com 30% em massa de sisal. Os autores atribuíram essa melhoria na estabilidade térmica a uma boa interação entre a fibra e a matriz. Porém, na figura 14 (b), fica evidenciado que o tratamento dado a essas fibras, demonstrou uma sensível melhora nas propriedades de interface alterando diretamente as propriedades de estabilidade térmica.

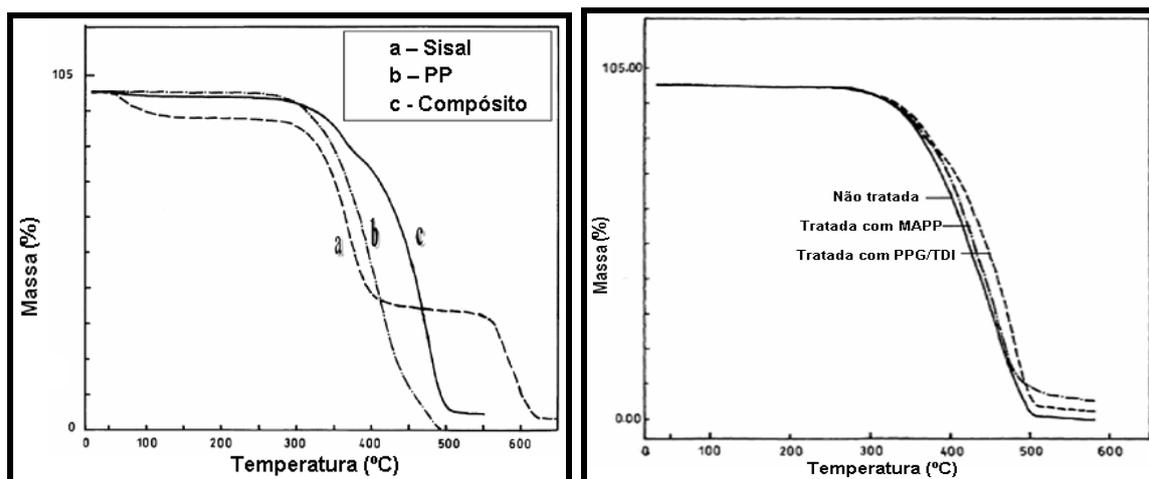


Figura 14. Análise termogravimétrica (a) do sisal, do PP e do compósito sisal e PP, com 30% m de fibra. (b) Comparação entre a fibra não tratada e os tratamentos de polipropileno glicol (PPG) / tolueno diisocianato (TDI) e polipropileno grafitizado com anidrido maleico (MAPP)

Em relação ao comportamento térmico dos compósitos contendo fibras naturais obtidos por calorimetria diferencial de varredura (DSC), o que tem sido observado é que a temperatura de fusão (T_m) permanece praticamente inalterada, enquanto a temperatura de cristalização no resfriamento (T_c) da matriz é deslocada para temperaturas maiores. Este comportamento indica que essa fibra natural exerceu um efeito nucleante sobre a matriz polimérica. Os compósitos contendo 30% em massa de fibras curtas de sisal apresentaram um aumento significativo de 8 °C frente ao PP puro. Para este sistema o grau de cristalinidade também aumentou.

Curauá

Araújo e colaboradores (2008) avaliaram o processo de degradação térmica (Figura 15) de um compósito de HDPE com 20% em massa de fibra de curauá (*Ananas erectifolius*), preparado em extrusora de dupla rosca co-rotante e interpenetrante com e sem agentes de acoplamento. Os agentes de acoplamento, copolímero de etileno - acetato de vinila (EVA) e HDPE graftizado com anidrido maleico (MAPE), foram adicionados separadamente no percentual de 2% em massa.

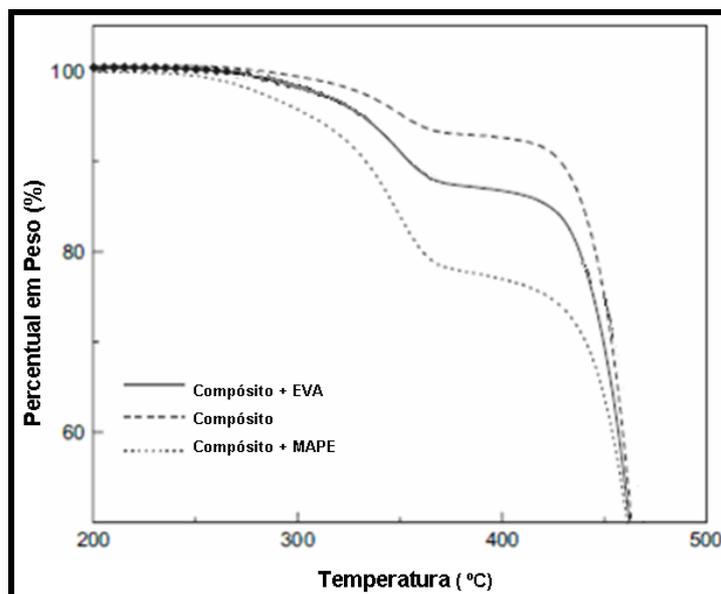


Figura 15. Curvas termogravimétricas do compósito HDPE/fibra de curauá: 80/20%*m* com e sem agentes de acoplamento (copolímero de etileno - acetato de vinila (EVA) e HDPE graftizado com anidrido maleico (MAPE) (ARAÚJO, 2008)

Baseados na curva de perda de massa dessa fibra, observaram a presença de dois estágios de degradação desse material. Num primeiro momento, a perda de massa foi atribuída ao processo de decomposição da pectina, lignina e hemicelulose. Após esse estágio, ocorreu uma breve estabilização na curva e, então, outra degradação mais acentuada, que foi o último estágio de degradação dessa fibra, na qual a α -hemicelulose foi decomposta.

Bagaço de Cana e Fibra de Madeira

Com a finalidade de verificar o efeito do agente de acoplamento sobre a temperatura de decomposição da fibra, Lei e colaboradores (2007) avaliaram a

influência de agentes de acoplamento com a carga de bagaço de cana e madeira pinho (*Pinus sp.*) em compósitos de HDPE reciclado (rHDPE). Nesta avaliação, os autores mantiveram o percentual de fibra constante em 30% em massa e adicionaram percentuais de 1,5% em massa de copolímero de polietileno e anidrido maleico (MAPE) ou 1,5 % em massa de uma mistura derivada de titânio (TDM) ou 0,9% de polietileno carboxilado (CAPE).

A mistura dessa material foi realizada em uma câmara de mistura e os corpos de prova avaliados foram preparados por compressão. Na Figura 16 são apresentadas as curvas de perda de massa desses materiais. Como principal observação, foi possível notar que o rHDPE possui uma temperatura de degradação em 440 °C, sendo a temperatura de degradação das fibras bem inferior a esse valor, por volta de 256 °C. Para o compósito, foi observado que tanto o rHDPE/bagaço quanto o rHDPE/pinho não apresentaram melhoras significativas em suas temperaturas de degradação em relação à fibra pura.

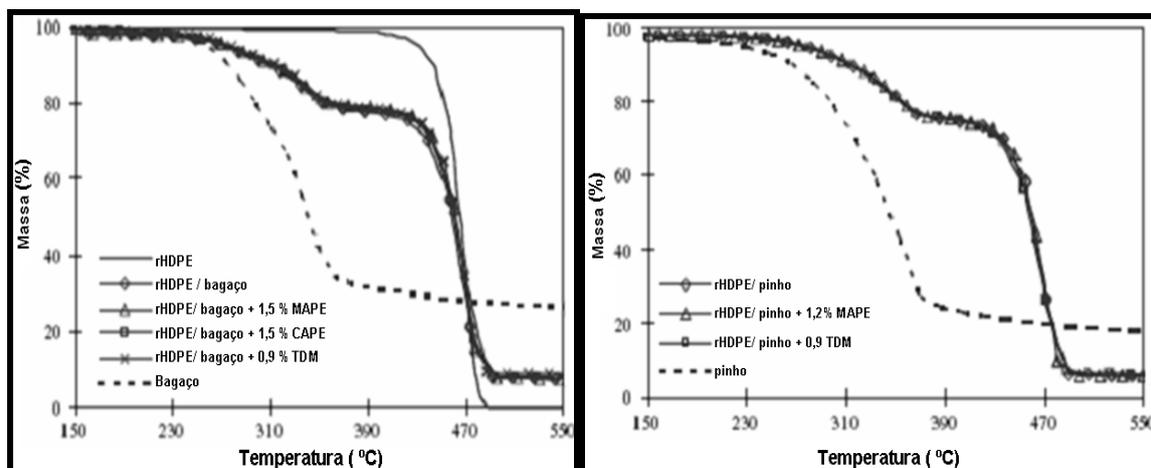


Figura 16. Curvas de perda de massa em função da temperatura. (a) rHDPE, fibra de bagaço de cana, compósito de rHDPE e bagaço de cana. (b) fibra de pinho e compósito de rHDPE/ fibra de pinho (LEI, 2007)

Notou-se dois estágios de degradação para o material compósito, sendo o primeiro estágio de degradação referente à fibra e o segundo estágio referente à matriz. Além disso, não houve aumento na temperatura de degradação com o uso desses agentes de acoplamento.

3.5.3 Propriedades Morfológicas

As diferentes formas de processamento de um material bem como os inúmeros aditivos e cargas dependem não somente das propriedades intrínsecas de seus constituintes, mas também da forma como estão estruturados fisicamente na mistura. Por isso, a avaliação dessa estrutura por meio de técnicas microscópicas permite uma melhor avaliação da estrutura obtida. Dentre as inúmeras formas de se caracterizar este material, está a microscopia eletrônica de varredura (SEM), que permite o estudo da morfologia dos compósitos.

Piaçava

Bonelli e colaboradores (2005) preparam um compósito de polietileno de alta densidade com fibra de piaçava submetida a um tratamento com silano de duas diferentes formas, conforme apresentado anteriormente (pág. 19).

As micrografias (Figuras 17 e 18) demonstram uma nítida separação entre a matriz e o reforço, comprovando assim a baixa compatibilidade entre os componentes. Porém, na Figura 18, observou-se uma maior rugosidade na interface entre fibra e matriz, indicando que a adição de silano à fibra aumentou a compatibilidade entre matriz e reforço e, em conseqüência, as propriedades mecânicas.

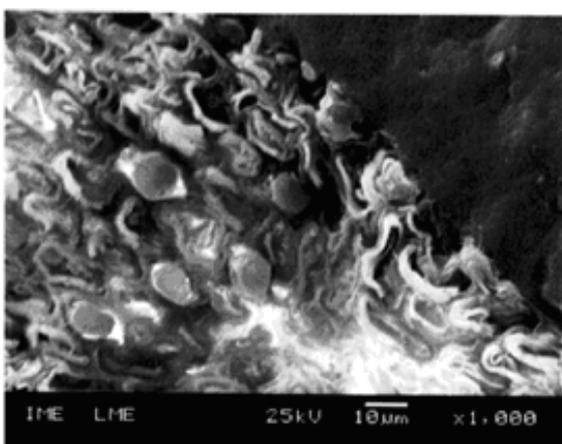


Figura 17. Fotomicrografia por SEM do compósito rHDPE/fibra 85/15% m/m não tratada (BONELLI, 2005)

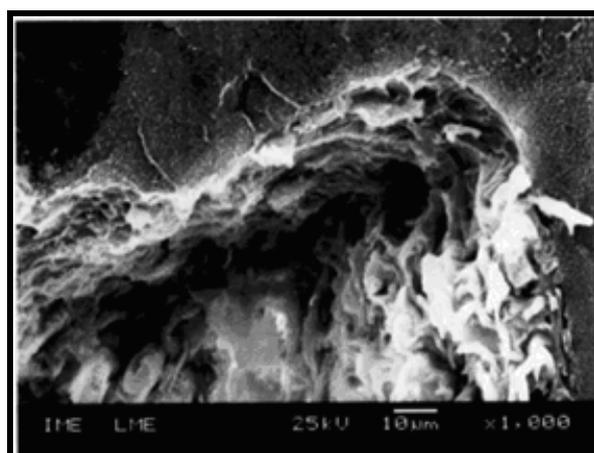


Figura 18 . Fotomicrografia do compósito rHDPE/fibra tratada: 85/15 %m/m com silano (BONELLI, 2005)

Fibra de coco

Ishizaki e colaboradores (2006) preparam compósitos de polipropileno com 10, 20 e 30% em volume de fibra de coco verde (*Cocos nucifera*), sendo a mistura feita em câmara de mistura Haake, tendo como variáveis a temperatura de processamento e a velocidade de cisalhamento.

Na Figura 19 (A – F) são apresentadas as fotomicrografias de SEM, com aumento de 100x, dos compósitos de PP-fibra de coco verde obtidos a 170° C, com diferentes teores de fibra e em duas velocidades de cisalhamento, 20 e 60 rpm.

O autor destaca uma interface bem definida entre a fibra e a matriz polimérica, facilmente observado nas micrografias 19 C-H. As fibras encontram-se descoladas da matriz polimérica, conforme indicado pelas setas, sugerindo pouca afinidade entre as fases.

A baixa afinidade entre os componentes é atribuída à queda do módulo de flexão das composições contendo fibras, resultado comparado ao do PP puro. Considerando o aumento da velocidade de rotação, a tendência é que ocorra uma melhor homogeneização das misturas.

O aumento da velocidade pode também causar desfibrilação, o que resultaria em maior área específica das fibras, favorecendo a adesão na matriz. A velocidade de rotação, no entanto, não deve ser muito elevada, de modo a evitar a quebra das fibras.

Observando-se as fotomicrografias 19 (C) e (D) é possível perceber que no composto obtido a 60 rpm praticamente não há presença de fibras, quando comparado com o composto obtido a 20 rpm. Segundo os autores, é proposto que a grande heterogeneidade da carga pode ter influenciado nos resultados de módulo de flexão.

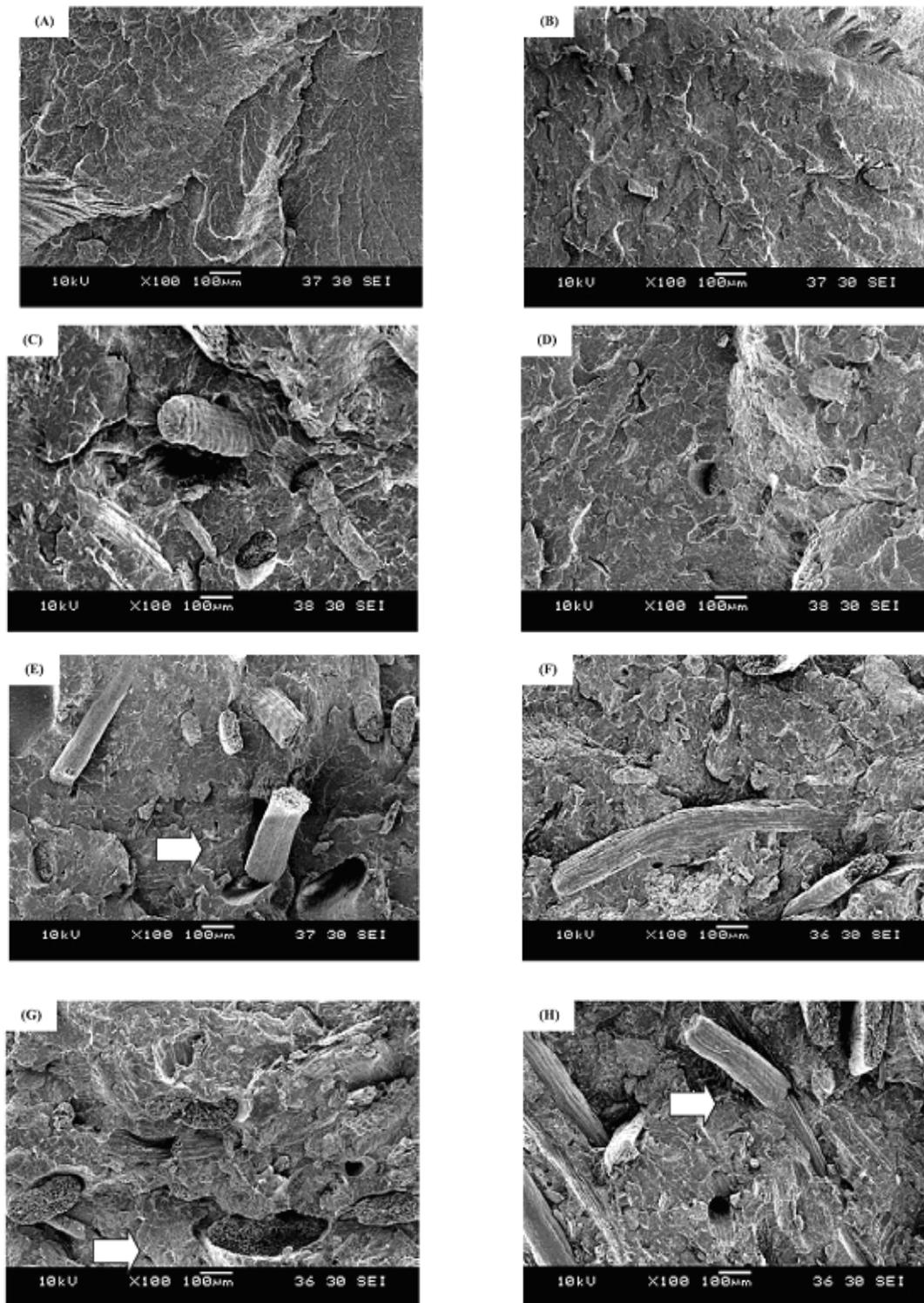


Figura 19. Fotomicrografias de SEM da superfície de fratura dos compósitos PP/ fibra de coco verde obtidos a 170°C (100 X) A) 100/0 – 20 rpm; (B) 100/0 – 60rpm; (C) 90/10% m/v– 20 rpm; (D) 90/10% m/v – 60 rpm; (E) 80/20% m/v – 20 rpm; (F) 80/20% m/v – 60 rpm; (G) 70/30% m/v – 20 rpm; (H) 70/30% m/v – 60 rpm (ISHIZAKI, 2006)

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

O resumo das atividades desenvolvidas nessa Dissertação está esquematizado na Figura 20. A fibra de vidro foi utilizada somente para efeito de comparação das propriedades mecânicas dos compósitos.

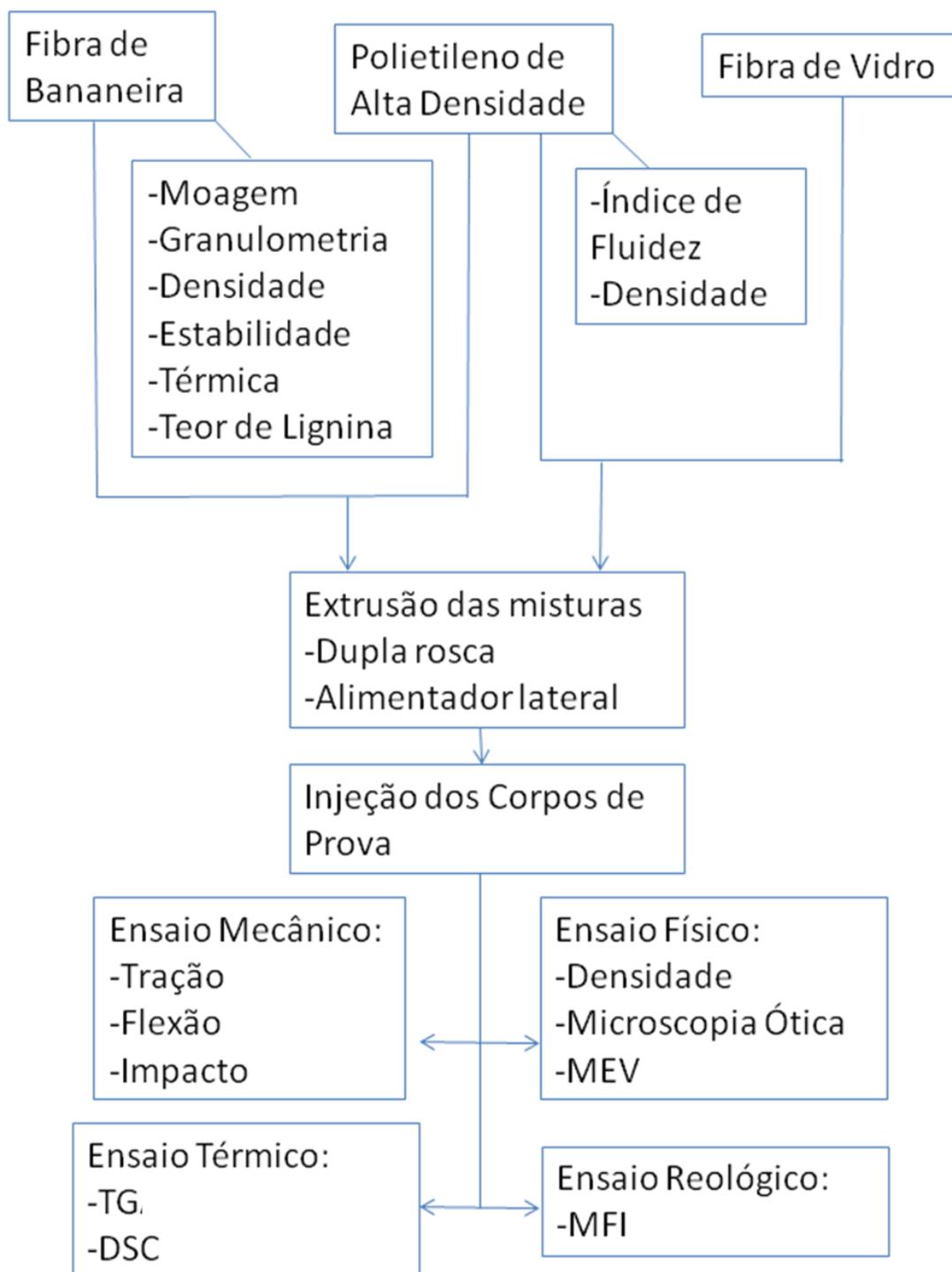


Figura 20: Esquema das atividades desenvolvidas na Dissertação

4.1 – MATERIAIS

Nessa Dissertação, foram utilizados os materiais apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Informações dadas pelos fornecedores dos materiais utilizados nessa Dissertação

Material	Especificação	Fornecedor	Densidade (g/cm ³)	Informações complementares
Polietileno de alta densidade - HDPE	HD 7255 LS	Ipiranga, RS	0,93	MFI= 5,40g/10min
Fibra de bananeira	Última cestaria ¹	Coopfibra, RJ	1,08	Fibras aglomeradas
Fibra de vidro	EC10 4,5 952	OCV Reinforcements Ltda, SP	2,55	10 µm de diâmetro
Ácido sulfúrico – H ₂ SO ₄	P.A.	VE TEC, RJ	1,84	
Etanol	P.A.	VE TEC, RJ	0,80 (25°C)	
Benzeno	P.A.	Grupo Química, RJ	0,88	

1. Denominação da Coopfibra

4.2 – EQUIPAMENTOS

A maior parte dos equipamentos que foram utilizados para o desenvolvimento dessa Dissertação encontra-se nas dependências do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Entre eles:

- Estufa com circulação de ar, Erzinger Ind. Mec. Ltda.
- Extrusora dupla-roscas co-rotacional interpenetrante marca TEK TRIL modelo DCT20, com diâmetro de roscas de 20 mm e razão entre comprimento e diâmetro das roscas (L/D) igual a 36.
- Injetora ARBURG Allrounder, modelo 270S 400-170.
- Termorregulador do molde de injeção, marca Shini Plastic Technologies, modelo STM-907 - HT

- Máquina de ensaios universais EMIC, modelo DL 3000.
- Pêndulo Resil Impactor da CEAST, com martelos de 2 e 4 J.
- Microscópio ótico Olympus BX-50, Stereo SZH 10 com máquina digital Nikon cool pix 5400.
- Paquímetro Mitutoyo, sensibilidade 0,05 mm.
- Microscópio eletrônico de varredura – Modelo JEOL JSM – 5610LV.
- Peneirador elétrico Produtest, modelo T;
- Analisador termogravimétrico (TGA) TA Instruments, modelo Q500;
- Calorímetro diferencial de varredura (DSC) TA Instruments, modelo Q100.

Os equipamento utilizados para desfibrar estão localizados no galpão da empresa Spill Engenharia, localizada no Rio de Janeiro:

- Moinho de martelo motoroan, feito sob encomenda.
- Moinho de lâminas motoroan, feito sob encomenda.

4.3 MÉTODOS

A fibra de bananeira utilizada nos compósitos foi caracterizada quanto a sua distribuição granulométrica, teor de lignina, teor de umidade, densidade e estabilidade térmica.

Os materiais obtidos por extrusão e, posteriormente, injetados para a produção de corpos de prova, foram analisados por meio de suas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas.

4.3.1 – Moagem

As fibras tratadas e cortadas do tronco foram obtidas na Cooperativa de Bananeira Coopfibra localizada na cidade de Rio Bonito, RJ. Na Coopfibra, as fibras foram extraídas manualmente do pseudocaule de bananeiras de qualidade

prata sob a forma de tiras, previamente lavadas em solução de extrato pirolenhoso e secas em temperatura ambiente.

Em uma unidade fabril, esse material tratado e seco foi desfibrado em equipamento constituído de lâminas para desfibrar as tiras do pseudocaule da bananeira (Figura 21) e, posteriormente, moído em moinho de martelo com malha de 1mm.



Figura 21. Lâminas do desfibrador usado para desaglomerar as fibras de bananeira (Elaboração própria)

A distribuição granulométrica do material moído foi realizada em peneirador vibratório de laboratório com dispositivo para controle da frequência das vibrações e relógio automático. Foram utilizadas 3 peneiras (16, 20 e 40 mesh) para determinação da distribuição dos tamanhos das fibras de modo a limitar os diâmetros máximo e mínimo da fibra entre os valores 1,19 mm e 0,42 mm.

4.3.2 – Secagem das fibras

A fibra de bananeira é uma fibra lignocelulósica e apresenta hidroxilas em suas moléculas que podem formar ligação hidrogênio com a umidade presente no ar (LIU, 2009). Estes materiais hidrofílicos apresentam elevados teores de umidade e extrusoras com dupla-roscas não são eficientes para o processamento de material com umidade acima de 1% (SANTOS, 2008). Além disso, a matriz polimérica é altamente hidrofóbica. Por todos esses fatores, é fundamental o processo de secagem eficiente, além daquele da secagem natural, para obtenção de um compósito com boas propriedades mecânicas.

As fibras foram previamente secas e permaneceram na estufa por 12 horas a 60°C e armazenadas em dessecador até o momento de serem processadas na extrusora.

4.3.3 – Obtenção das misturas e definição dos parâmetros

Os compósitos poliméricos HDPE/fibra de bananeira foram preparados por meio do processo de extrusão, sendo posteriormente injetados para a obtenção dos corpos de prova de ensaio mecânico. Primeiramente, através de uma análise de planejamento de experimentos, foi avaliado o grau de influência dos parâmetros de processamento (temperatura de processamento, percentual de fibra e tamanho da fibra) nas propriedades mecânicas (módulo de resistência à tração e flexão).

Depois de realizada essa avaliação, foram fixados os parâmetros que não influenciaram no processo estudado e variou-se aquele que foi mais significativo para essas propriedades.

4.3.3.1. Planejamento de experimentos

Inicialmente foram definidos quais seriam os fatores e as respostas de interesse. Os fatores são variáveis que o experimentador manipula, podendo ser qualitativas ou quantitativas. As respostas são variáveis de saída do sistema, nas quais há interesse e que podem ser afetadas por modificações provocadas nos fatores. Nesse trabalho de Dissertação, os fatores pré-definidos foram a temperatura de processamento, tamanho da fibra e percentual de fibra

Com os fatores acima foi construído o Planejamento Experimental Completo 2^3 , sendo três os fatores estudados no processo e dois os respectivos valores de níveis em que cada fator foi analisado e um ponto central que foi feito em triplicata. Esse tipo de planejamento foi escolhido porque se presta bem para a investigação preliminar da relevância ou influência do fator selecionado sobre a resposta obtida. As condições de processamento estudadas, denominadas fatores, e seus respectivos níveis estão apresentados na Tabela 5. Os níveis considerados como valores máximos e mínimos para cada uma das variáveis mencionadas acima foram selecionados com base nos limites oferecidos pela

extrusora e pelas características do material processado, evitando-se assim a degradação da fibra e problemas de alimentação no equipamento.

Tabela 5. Fatores e níveis utilizados no planejamento fatorial

Fatores	Nível inferior (-1)	Ponto central (0)	Nível superior (+1)
Temperatura de Processamento (°C)	170	185	200
Comprimento da fibra (mm)	< 0,42	0,42 > X > 0,84	0,84 > X > 1,19
Percentual em massa de fibra (%)	10	20	30

Para a realização do planejamento fatorial 2^3 completo foi confeccionada uma Tabela com auxílio do programa STATISTICA© 9.0 com todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores, resultando em 11 experimentos, como mostra a Tabela 6. A sequência de processamento em extrusora das 11 misturas foi realizada de modo aleatório a fim de se evitar ocorrência de distorção estatística nos resultados.

Tabela 6. Tabela de planejamento de experimentos para avaliação de parâmetros de processo

Experimento (Ordem de execução do experimento)	Temperatura de processamento	Comprimento da fibra	Percentual de fibra
9 (C*)	0	0	0
1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1
7	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1
10 (C*)	0	0	0
5	-1	-1	+1
11 (C*)	0	0	0
2	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1
3	-1	+1	-1

*C – refere-se ao ponto central do planejamento; “+1” refere-se ao valor máximo; “-1” refere-se ao valor mínimo; e, “0” refere-se ao valor central.

A Tabela 7 reúne as condições operacionais de temperatura de processamento das amostras, bem como o comprimento da fibra e o percentual de fibra na mistura. São também apresentados os códigos adotados para a identificação de cada amostra na coluna referente ao experimento.

Tabela 7. Nomenclatura para os compósitos e condições operacionais utilizadas no planejamento de experimentos

Experimento	Temperatura de processamento (°C)	Comprimento da fibra (mm)	Percentual de fibra (%m)
Am 1	170	< 0,42	10
Am 2	200	< 0,42	10
Am 3	170	0,84>X>1,19	10
Am 4	200	0,84>X>1,19	10
Am 5	170	< 0,42	30
Am 6	200	< 0,42	30
Am 7	170	0,84>X>1,19	30
Am 8	200	0,84>X>1,19	30
Am 9	185	0,42>X>0,84	20
Am 10	185	0,42>X>0,84	20
Am 11	185	0,42>X>0,84	20

As variáveis respostas selecionadas para a investigação do sistema proposto foram os módulos resultantes dos ensaios mecânicos de resistência à tração e resistência à flexão.

4.3.3.2 – Processamento

Os compósitos foram preparados em extrusora dupla-roscas co-rotacional. A extrusora possui 9 zonas de aquecimento independentes no barril e uma no cabeçote. A configuração das roscas utilizadas é apresentada na Figura 22. As roscas foram configuradas com dois segmentos com elementos de mistura do tipo KB (*kneading blocks*) de mistura para inicialmente homogeneizar o polímero e depois homogeneizar a fibra e a matriz polimérica. Essas zonas de mistura eram intercaladas por elementos de condução(C). O perfil de temperaturas utilizado no

barril foi de 150°C na primeira zona e 170°C nas demais zonas e no cabeçote. A rotação das roscas foi de 300 rpm.

Durante o processamento o polímero foi introduzido no sistema através do funil principal, sendo fundidos e homogeneizados na primeira zona de mistura da rosca. A fibra de bananeira (FB) foi dosada na extrusora por meio de alimentador lateral, junto aos polímeros já fundidos. A homogeneização da FB com o polímero foi realizada na segunda zona de mistura da rosca. A inserção da fibra na extrusora nessa zona da rosca teve o objetivo de reduzir o tempo de residência desse material no equipamento diminuindo a possibilidade de degradação térmica da fibra de bananeira. Após a homogeneização da FB com os polímeros, a massa fundida foi submetida à degasagem.

Os dosadores da extrusora (principal e lateral) foram calibrados por meio da aferição de suas vazões em função da rotação da rosca dos seus dosadores. Através de variações seqüenciadas da rotação das roscas dos dosadores, obtiveram-se valores de massa em função do tempo de aquisição. A relação massa/tempo é denominada vazão, e para cada rotação testada, um valor de vazão foi obtido.

De posse dos dados de rotação e vazão, curvas de calibração do tipo vazão (kg/h) *versus* rotação (rpm) foram obtidas possibilitando o ajuste ideal para a formulação de cada composição. Objetivou-se trabalhar com a vazão de 4 Kg/h, porém em alguns casos como não era possível fracionar o valor de rotação, utilizou-se um valor próximo na qual não excedesse 50% do valor máximo de torque do equipamento. Os valores de composição e rotação estão apresentados na Tabela 8.

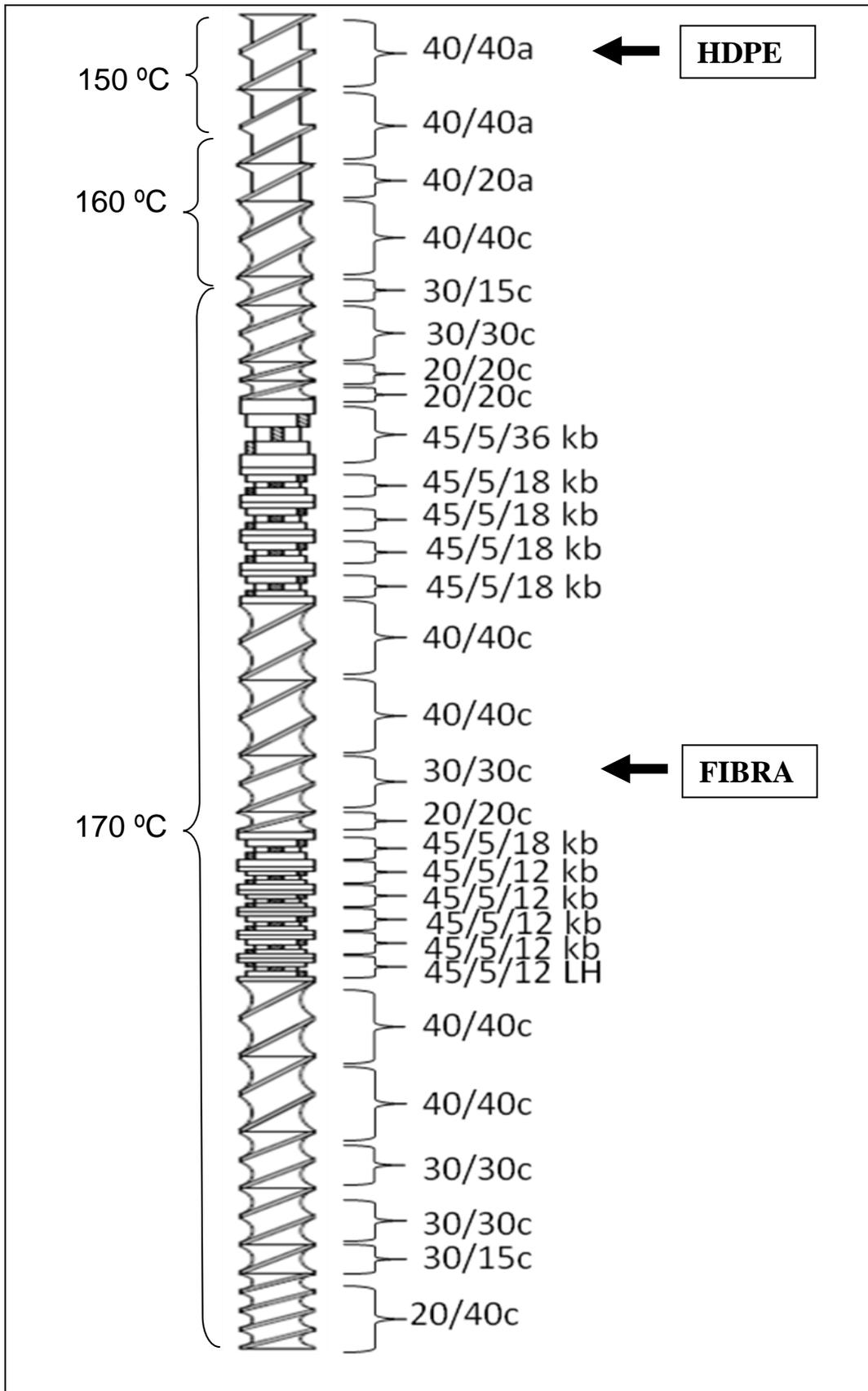


Figura 22. Perfil da rosca da extrusora. A – alimentação, C – condução, KB – elementos de mistura, LH - elementos de mistura com passo reverso

Tabela 8. Rotação dos alimentadores em função da composição extrusada

Composição (%)	Material	Rotação (RPM)
100	HDPE	11
0	Fibra de bananeira	0
90	HDPE	12
10	Fibra de bananeira	14
80	HDPE	9
20	Fibra de bananeira	22
70	HDPE	9
30	Fibra de bananeira	41
60	HDPE	7
40	Fibra de bananeira	44

4.3.3.3- Moldagem por injeção

Após extrusão e granulação, corpos de prova para a caracterização dos compósitos foram obtidos por injeção. Para cada compósito injetado, foram obtidos 10 corpos de prova para cada tipo de ensaio mecânico (30 corpos de prova ao total).

A injetora possui cinco zonas de aquecimento, que foram ajustadas para perfeita plastificação do material extrusado. O perfil de temperatura empregado foi de 150 a 180°C. A temperatura do molde foi de 60°C, mantida por um termorregulador a óleo. A velocidade (vazão) de injeção empregada foi 30 cm³/s, a comutação para recalque por volume foi de 95%, a pressão de recalque foi 1000 bar por 4 segundos e o tempo de resfriamento no molde foi de 30 segundos.

4.3.4 – Ensaio mecânicos

As propriedades mecânicas de um material são analisadas com o intuito de se obter uma resposta desses materiais às influências mecânicas externas, manifestadas pela capacidade de desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura (OLIVEIRA, 2007).

Nessa Dissertação foram avaliadas as propriedades mecânicas de resistências à tração, à flexão e ao impacto. Os valores foram determinados a partir da mediana e o desvio padrão do ensaio de 5 corpos de prova para a resistência tênsil e de 8 corpos de prova para o impacto. Não foram utilizados todos os corpos de prova injetados pois a norma prevê uma quantidade mínima e somente em caso de desvio grande se faça mais corpos de prova.

4.3.4.1 – Ensaio de resistência à tração

No ensaio de resistência à tração (ASTM D 638, 2003) foram avaliados os parâmetros de módulo sob tração e tensão na força máxima. Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaio universal. A velocidade desse ensaio foi de 5 mm/min (taxa de deformação de $0,0017 \text{ s}^{-1}$).

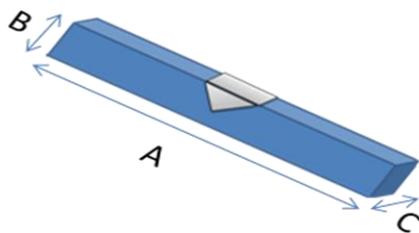
4.3.4.2 – Ensaio de resistência à flexão

A resistência à flexão (ASTM D 790, 2003) representa a habilidade do material em suportar uma força, aplicada perpendicularmente ao seu eixo longitudinal. Os ensaios de flexão foram realizados em máquina de ensaio universal. A velocidade de ensaio foi de 1 mm/min (taxa de deformação de $0,0017 \text{ s}^{-1}$).

4.3.4.3 – Ensaio de resistência ao impacto

A resistência ao impacto (ASTM D 256, 2003) representa a tenacidade, sendo determinada pela quantidade de energia requerida para fraturar uma amostra padrão sob condições específicas (MANO, 2003; RAYMOND, 1988).

As dimensões dos corpos de prova estão apresentadas na Figura 23. Após o entalhe, receberam uma energia de impacto oriunda de um martelo (pêndulo) e a quantidade de energia absorvida pela amostra foi determinada. O teste foi feito na velocidade de impacto de 3,46 m/s a 25 °C, segundo método IZOD. Foi usado o pêndulo com energia de impacto de 2J para os compósitos com fibra de bananeira e de 4J para os compósitos com fibra de vidro e para o HDPE puro.



A= 60mm, B= 12mm, C= 3 mm

Figura 23 – Corpo de prova do impacto (Elaboração própria, baseada na norma ASTM D 256 (2003))

4.3.5 – OUTROS ENSAIOS

Os ensaios físicos têm por finalidade determinar as propriedades físicas do material analisado (ROZMAN, 2000).

4.3.5.1 – Teor de umidade na fibra

No ensaio de umidade (ASTM D 1348, 1961) foi colocada uma massa conhecida do material em estufa até valor de temperatura constante, com pesagem do material antes e após o processo de secagem. Foram avaliadas 5 amostras da fibra. A determinação do teor de umidade foi realizada segundo a Equação 6.

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{M_U - M_S}{M_U} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Na qual,

M_u = massa da amostra úmida;

M_s = massa da amostra seca;

4.3.5.2 – Densidade

A densidade de um material reflete a sua estrutura química e sua organização molecular (MANO, 2003). O teste específico de densidade para a fibra foi realizado com picnômetro. Esse método determina a densidade aparente de

materiais sólidos por meio da medição indireta da massa e do volume do sólido em um balão específico chamado picnômetro, utilizando-se um líquido de densidade conhecida.

A medição foi realizada segundo a norma ISO 8962 (1987), utilizando-se da Equação 7. Foram realizadas cinco medidas para cada fibra e o resultado final da densidade foi obtida a partir da média das cinco medidas. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C).

$$Densidade = \frac{\rho (m_3 - m_1)}{(m_3 - m_1 + m_2 - m_4)} \quad \text{Equação 7}$$

Na qual,

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

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

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

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

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

No caso do HDPE puro e dos compósitos, a amostra foi pesada por um fio suspenso no ar e registrar o peso do fio com a amostra. A amostra também foi pesada imersa em etanol. A densidade foi obtida segundo a norma ASTM D 792 (1991). O cálculo está descrito na Equação 8.

$$Densidade = \frac{A}{A-B} \times \rho \quad \text{Equação 8}$$

Em que,

σ = densidade do etanol em g/mL (temperatura = 25 °C);

A = (massa da amostra + massa do fio no ar) – (massa do fio no ar) em g;

$B = (\text{massa da amostra} + \text{massa do fio no líquido}) - (\text{massa do fio no líquido})$ em g

4.3.5.3 – Microscopia eletrônica de varredura (SEM)

A morfologia dos compósitos foi analisada por microscopia eletrônica de varredura, uma técnica utilizada na avaliação de aspectos como adesão interfacial e morfologia superficial dos componentes presentes em compósitos poliméricos (AMIM, 2006).

A análise foi feita em microscópio eletrônico de varredura nas seguintes condições: voltagem de aceleração de elétrons igual a 20 KV e ampliação de 50 e 3500 vezes. As amostras foram recobertas por ouro.

Foram analisadas as superfícies fraturadas, em nitrogênio líquido, perpendicularmente ao fluxo de preenchimento do molde da seção reta dos corpos de prova tipo barra, moldados por injeção.

4.3.5.4 – Microscopia ótica (OM)

Com o intuito de avaliar a razão de aspecto da fibra, foram fotografadas as fibras de bananeira antes do processamento e os compósitos HDPE/fibra de bananeira com teores de fibras de 20 e 40% em massa microscópio ótico.

As análises dos compósitos se deram nos corpos de prova sob a forma de placas com aproximadamente 0,3 mm. Foram colocadas 35 g de amostra do compósito entre duas placas metálicas, sob aquecimento, sem espaçador. As placas foram obtidas por compressão em prensa Carver a 190°C, pressão de 0,2 MPa durante 2 minutos. Em seguida, essas placas metálicas com os compósitos foram resfriadas em prensa hidráulica com circulação de água sob mesma pressão durante 2 minutos. Foram capturadas, em média, 12 imagens para cada amostra analisada, com aumento de 50 vezes.

4.3.6 - Análise térmica

A análise térmica permite verificar as variações de um determinado parâmetro em função do tempo, mantendo-se a temperatura constante (modo isotérmico) ou em função da temperatura, variando-a com aquecimento ou resfriamento (LUCAS,

2001). Dentre as técnicas termoanalíticas, a termogravimetria e a calorimetria diferencial de varredura foram utilizadas nessa Dissertação. A análise termogravimétrica (TG) é definida pela ICTAC (*International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry*) como uma técnica em que a variação de massa de uma amostra é medida em função da temperatura através de um controle programado de variação térmica (HAYNES & HEAL, 2002).

Foram avaliadas as estabilidades térmicas das fibras de bananeira e dos compósitos contendo 20 e 40 % em massa de fibra. A análise foi feita sob atmosfera de oxigênio para as amostras, com velocidade de 10°C/min e com faixa de aquecimento compreendida entre 30 e 700°C

4.3.7 – Calorimetria diferencial de varredura

As amostras foram submetidas ao ensaio calorimétrico em um calorímetro diferencial de varredura (DSC), sob atmosfera de nitrogênio. Os materiais foram submetidos a uma faixa de temperatura que variou de 20 °C a 170 °C, a uma taxa de velocidade de 10 °C/min. Para o cálculo de cristalinidade relativa, o valor de ΔH^0 padrão considerando o HDPE 100% cristalino foi de 288 J/g (KHONAKDAR ET. AL., 2003). O cálculo foi feito segundo a Equação 9.

$$X_c = \frac{\Delta H_F}{\Delta H^0_F \times \phi_c} \times 100$$

Equação 9

Em que,

ΔH_F = entalpia calculada da amostra

ΔH^0_F = entalpia padrão da matriz polimérica

ϕ_c = fração em massa da matriz no compósito

4.3.8 – Determinação do teor de lignina

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

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

Em seguida o material foi colocado em solução de ácido sulfúrico 72% v/v à temperatura ambiente por um período de 2 horas com freqüente agitação. Posteriormente, adicionou-se água destilada ao meio reacional até reduzir a concentração da solução ácida a 3 % v/v. A solução foi transferida para um sistema com condensador de refluxo e aquecida até ebulição durante 4 horas.

Após esse período de 4 horas, a lignina foi lavada com água quente até neutralização, filtrada e seca em estufa até peso constante e, então, pesada. O teor de lignina foi determinado a partir da média dos resultados de três medidas, utilizando-se a Equação 10 (MORAIS, 2005).

$$\% L_i = \frac{m_1 \times 100}{m_2} \quad \text{Equação 10}$$

Em que,

$\%L_i$ = lignina insolúvel na amostra,

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

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

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da caracterização da fibra de bananeira e de suas misturas com HDPE em extrusora dupla-roca co-rotacional. Os compósitos foram avaliados quanto as suas propriedades mecânicas, térmicas e outras físicas.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE BANANEIRA

As fibras de bananeira foram classificadas pelo comprimento da fibra e caracterizadas segundo a densidade, teor de lignina, teor de umidade e por análise termogravimétrica (TG). Dentre os diferentes tipos de fibras encontradas no tronco de bananeira, vale a pena ressaltar que nessa Dissertação foi usada a fibra mais externa, denominada de última cestaria.

5.1.1 – Determinação da distribuição granulométrica

As tiras secas do pseudocaule da bananeira foram alimentadas no desfibrador (Figura 21), um sistema que apresenta lâminas próximas desagregando as fibras que estão unidas e coesas na estrutura do pseudocaule. Após essa primeira etapa, observou-se uma redução do diâmetro e do comprimento, porém não suficiente para que pudesse ser processado na extrusora utilizada (item 4.3.4.1). Sendo assim, todo material processado passou em um sistema de moagem de moinho de martelo obtendo assim um tamanho máximo de trabalho ligeiramente superior a 16 mesh.

Após o processo de desfibramento e moagem das fibras, estas foram submetidas ao processo de peneiramento em um peneirador eletromecânico utilizando-se 3 peneiras com aberturas de telas de 16, 20 e 40 mesh (1,19, 0,84 e 0,42 mm, respectivamente). A distribuição mássica do processo de peneiramento encontra-se na Figura 24.

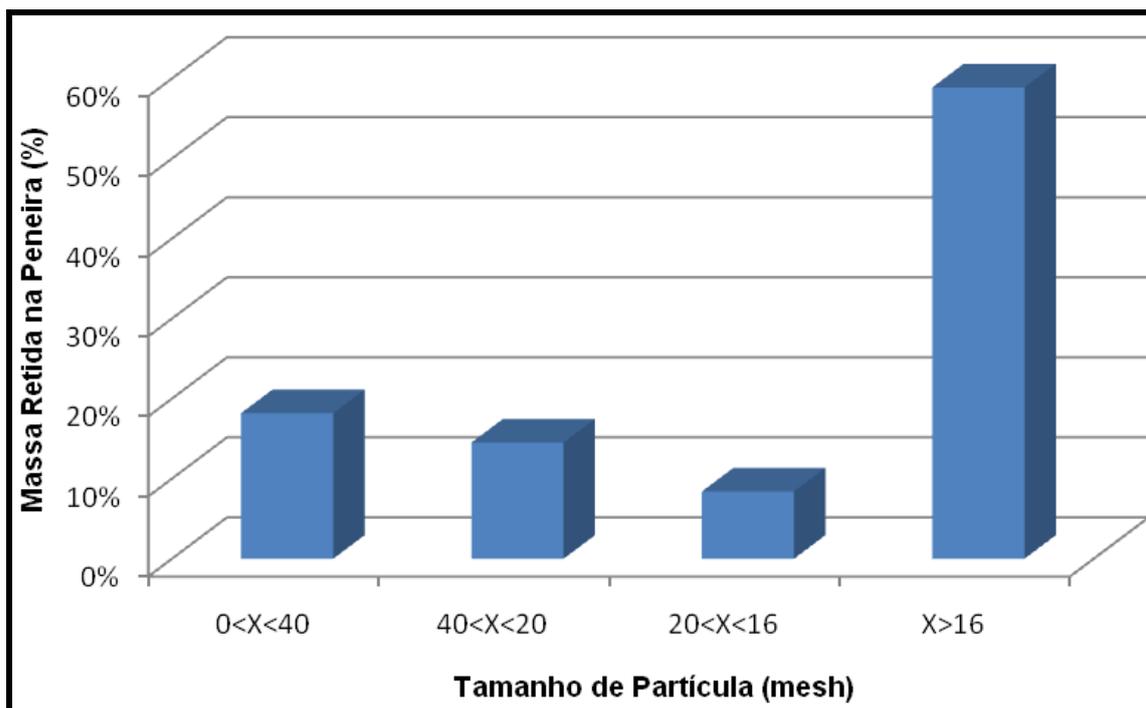


Figura 24. Fração percentual em massa das partículas retidas na peneira *versus* faixa de tamanho das partículas

O tamanho das partículas foi restringido entre 1,19 e 0,42 mm, por conta de limitações técnicas durante o processamento, pois as fibras maiores se aglomeram no sistema de alimentação formando chumaços que prejudicam a vazão de alimentação dessas cargas.

5.1.2 – Avaliação da estrutura da fibra por microscopia ótica

Foram obtidas fotografias em microscópio ótico das fibras com a finalidade de observar o aspecto e a sua regularidade. Foram fotografadas amostras de FB de menores dimensão (<40 mesh).

A Figura 25 (a) e (b) apresentam uma fotografia da amostra de fibra de bananeira obtida por microscopia ótica retida na peneira de 0,42 mm com ampliação em 2,5 e 10 vezes. Pode-se observar que as partículas apresentadas na foto exibem perfil alongado em sua maioria, porém apresentam diferentes diâmetros e comprimentos. Além disso, na Figura 26 é possível observar que a estrutura fibrosa, apresenta fibrilas unidas, que não foram desagregadas.

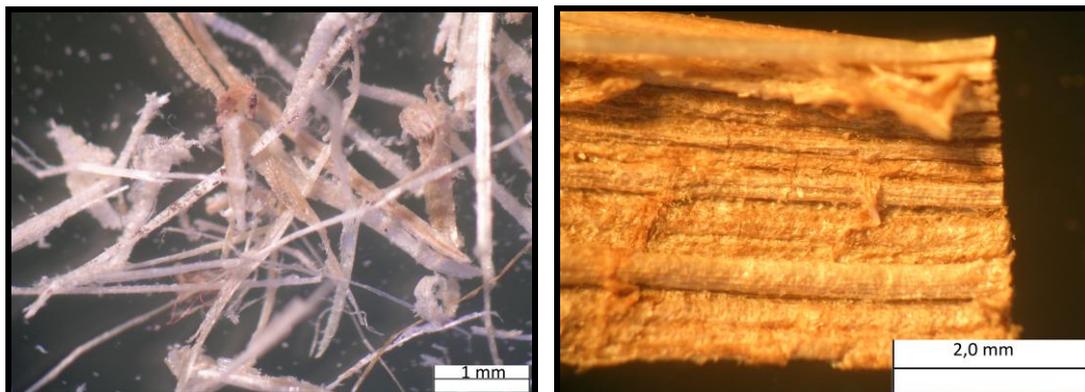


Figura 25: (a) Algumas fibras de bananeira com ampliação em 2,5 X. (b) Uma fibra de bananeira com ampliação em 10X

Através de uma análise minuciosa da Figura 26, é possível observar duas estruturas predominantes, uma estrutura circular e outra em forma de “meia-lua”.

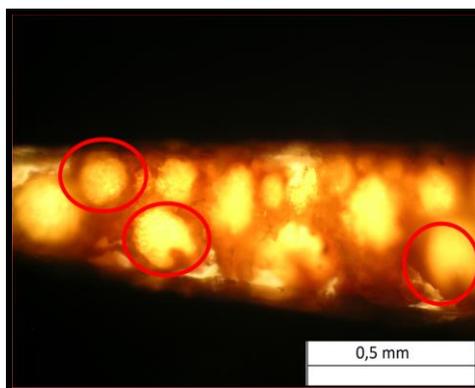


Figura 26. Fotografia em microscópio ótico da amostra de fibra de bananeira com ampliação em 20 X

Com o intuito de observar o lúmen da fibra, obteve-se uma fotografia com ampliação em 40X da estrutura da fibra (Figura 27). Observar-se que o lúmen da bananeira apresenta inúmeras formas e tamanhos, porém todas com um aspecto próximo a forma circular.

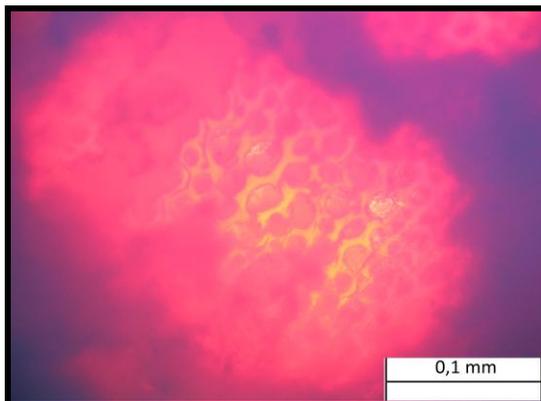


Figura 27. Fotografia em microscópio ótico da amostra de fibra de bananeira com ampliação em 40X.

5.1.3 Determinação do teor de lignina

A lignina é um polímero amorfo, de composição química complexa, que confere firmeza e rigidez ao conjunto de celulose. Em uma árvore, age como agente permanente de ligação entre as células, gerando uma estrutura coesa, resistente ao impacto, compressão e dobra (CELULOSE, 2007).

Quanto maior o teor de lignina mais interessante seria do ponto de vista do desempenho mecânico, pois a lignina é o constituinte responsável pela resistência mecânica da madeira em geral (SALIBA, 2001).

A determinação do teor de lignina da fibra de bananeira foi feita conforme o método de Klason, através de uma extração descrita no item 4.3.8.

O teor de lignina da fibra de bananeira, especificamente na última cestaria, obtido experimentalmente foi de $21,1 \pm 3,1\%$ em massa. Porém há grande divergência quanto ao valor real do teor de lignina na fibra da bananeira. Segundo Oliveira *et al.* (2007), o teor seria entre 33 e 37 %m de acordo com a parte do pseudocaule trabalhado. Porém Joseph *et al.* (2002) encontraram valores próximos de 5 %m no percentual de lignina para esse tipo de fibra.

Essa grande variação nos valores do teor de lignina não deve ser atribuída somente à diferença entre as espécies. De acordo com Kollmann e Côté (1984), a fibra lignocelulósica pode apresentar grande variação na composição química, até mesmo em se tratando de uma mesma espécie, por ser um material heterogêneo.

Segundo Silva *et al.* (2007), as variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da celulose ocorrem em função principalmente da idade, de fatores genéticos e ambientais.

5.1.4 Teor de umidade

O teor de umidade da fibra de bananeira foi determinado através da secagem da amostra do material em estufa até massa constante. As fibras de bananeira são materiais hidrofílicos devido à presença de grupamentos hidroxilas em sua estrutura (ISHIZAKI, 2006).

O teor de umidade médio encontrado para a fibra de bananeira foi de $11,4\% \pm 0,3$. Deve-se destacar que esse valor foi obtido após beneficiamento e secagem natural na cooperativa. Esse valor encontra-se na mesma faixa de umidade relatada para a madeira que fica entre 10-18% (YAMAJI, 2004).

Extrusoras com dupla-rosca são projetadas para processamentos de polímeros com um ponto de vazão ou escape para a remoção de voláteis, eficiente somente para umidade percentuais de umidade de até 1% (SANTOS, 2008).

Sendo assim, como essas fibras naturais apresentavam teor de umidade superior a 1%, foi necessária a secagem em estufa para um processamento eficiente através da extrusora.

Como a matriz polimérica utilizada foi uma poliolefina que possui características hidrofóbicas e com isso não absorve água, não foi necessária a secagem do polietileno de alta densidade (HDPE).

5.1.5 Densidade

Por meio de picnometria, descrita no item 4.3.5.2, foi determinada a densidade aparente da fibra de bananeira, obtendo-se um valor médio de $1,08 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$.

Utilizando-se da Tabela 9 para efeito de comparação da densidade obtida com outras fibras naturais, observa-se que a bananeira apresenta uma das menores densidades entre as fibras. Esse fator contribui para obtenção de compósitos mais leves, com menor peso específico.

Tabela 9. Comparativo entre as densidades de fibras naturais verificadas em GEETHAMA (1997) e da bananeira obtida experimentalmente nesta Dissertação

Propriedade	Coco ¹	Sisal ¹	Abacaxi ¹	Juta ¹	Bananeira ¹	Bananeira
Densidade (g/cm ³)	1,15	1,45	1,44	1,45	1,35	1,08

¹ GEETHAMA (1997)

O valor encontrado experimentalmente para densidade da fibra de bananeira é muito inferior a muitas cargas minerais. As cargas minerais, como o carbonato de cálcio, fibra de vidro, talco e caulim possuem densidade na ordem de 2,7 g/cm³ (BISMARCK, 2006; GASSAN, 2000).

5.2 – AVALIAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO

Foi realizado um planejamento de experimentos para a avaliação dos parâmetros de processamento utilizados na obtenção dos compósitos por extrusão. Este estudo estatístico enfatizou a obtenção das condições ótimas de operação.

5.2.1 Definição da matriz de experimentos, fatores e respostas analisados

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos e empregados como resposta da matriz de experimentos, utilizada nesse planejamento. Foram obtidas as variáveis de resposta de módulo de elasticidade e módulo sob resistência à flexão.

Tabela 10. Valores das respostas obtidas nos experimentos

Experimento	Módulo de elasticidade (MPa)	Módulo sob resistência a flexão (MPa)
Am 1	447	933
Am 2	528	1088
Am 3	97	1285
Am 4	473	994
Am 5	868	2334
Am 6	650	1531
Am 7	661	1908
Am 8	795	2545
Am 9	658	1083
Am 10	663	1103
Am 11	677	1262

5.2.2 Análise dos resultados obtidos do planejamento fatorial

O planejamento experimental foi realizado através do programa computacional STATISTICA® 9.0.

O modelo de análise proposto pela técnica de planejamento fatorial segue uma distribuição normal, dentro de um intervalo de confiança de $\pm 95\%$. Assim, pode-se dizer que o efeito em questão é estatisticamente significativo quando ambos os intervalos de confiança apresentam sinais iguais, ou seja, há uma relação de proporcionalidade entre as respostas obtidas e os fatores em questão.

No entanto, quando ambos os intervalos de confiança apresentam sinais opostos, há probabilidade que o verdadeiro valor do efeito seja nulo (zero), e com isso pode-se dizer que não há evidências suficientes para manter o fator em questão no modelo. Neste caso, o fator não é estatisticamente significativo. Então se pode afirmar que um efeito é estatisticamente significativo quando os limites dos níveis de confiança de -95% a 95% não incluem o valor zero (SILVA, 2010).

As Tabelas 11 e 12 apresentam a análise de significado estatístico para cada variável resposta empregada no processo. Foram consideradas as interações entre os fatores, bem como a interação de um fator com outro.

Tabela 11. Dados para significado estatístico de resposta do módulo de elasticidade à tração.

Fator	Efeito	Erro Puro	t(3)	p	-95%	+95%
M	592,4	3,0	199,5	0,00003	579,6	605,1
1	93,0	7,0	13,4	0,00556	63,0	123,0
2	-117,0	7,0	-16,8	0,00352	-147,0	-87,0
3	357,5	7,0	51,3	0,00038	327,5	387,5

Obs. M- média, 1- temperatura, 2 – comprimento, 3 – percentual

Tabela 12. Dados para significado estatístico de resposta do módulo sob resistência à flexão.

Fator	Efeito	Erro Puro	t(3)	p	-95%	+95%
M	1460,5	29,6	49,4	0,00041	1333,2	1587,7
1	-75,8	69,4	-1,1	0,38876	-374,2	222,7
2	211,3	69,4	3,1	0,09300	-87,2	509,7
3	1004,8	69,4	14,5	0,00473	706,3	1303,2

Obs. M- média, 1- temperatura, 2 – comprimento, 3 – percentual

Os valores das tabelas acima foram calculados considerando inicialmente todos os fatores selecionados pelo planejamento. Porém, de acordo com a discussão anterior, são considerados fatores estatisticamente significativos somente aqueles que apresentam os limites dos níveis de confiança de – 95% a 95% com mesmo sinal, ou seja, garantindo que não apresentam o valor zero. Além disso, pelas tabelas acima também é possível observar que estes fatores apresentam valor de “p” inferior a 0,05

Assim, foram então desconsiderados, para cada caso, os fatores que não demonstraram ter significado estatístico. Um novo cálculo foi realizado com os fatores relevantes e suas interações, conforme mostram as Tabelas 13 e 14.

Tabela 13. Dados para significado estatístico de resposta do módulo de elasticidade somente com fatores relevantes

Fator	Efeito	Erro Puro	t(3)	p	-95%	+95%
M	592,4	3,0	199,5	0,00002	579,6	605,1
1	93,0	7,0	13,4	0,00556	63,0	123,0
2	-117,0	7,0	-16,8	0,00352	-147,0	-87,0
3	357,5	7,0	51,3	0,00038	327,5	387,5
1*2	161,5	7,0	23,2	0,00185	131,5	191,5
1*3	-135,0	7,0	-19,4	0,00265	-165,0	-105,0
2*3	86,0	7,0	12,3	0,00649	56,0	116,0
1*2*3	14,5	7,0	2,1	0,17278	-15,5	44,5

Obs. M- média, 1- temperatura, 2 – comprimento, 3 – percentual

Tabela 14. Dados para significado estatístico de resposta do Módulo de resistência à flexão somente com fatores relevantes

Fator	Efeito	Erro Puro	t(3)	p	-95%	+95%
M	1460,5	29,6	49,4	0,00041	1333,2	1587,7
3	1004,8	69,4	14,5	0,00473	706,3	1303,2
1*2	248,3	69,4	3,6	0,06996	-50,2	546,7
1*3	-7,3	69,4	-0,1	0,92628	-305,7	291,2
2*3	82,8	69,4	1,2	0,35516	-215,7	381,2
1*2*3	471,8	69,4	6,8	0,02094	173,3	770,2

M- média, 1- temperatura, 2 – comprimento, 3 – percentual

Observando-se as Tabelas acima, pode-se notar que, para os dois casos, ainda aparecem fatores estatisticamente não significativos. Também pode ser verificado que, para as respostas analisadas, o fator percentual é relevante estatisticamente. Além disso, a interação entre os fatores também apresenta significado estatístico, provando que, para o processamento desse compósito, a análise de fatores isolados pode não explicar fielmente os fenômenos e resultados obtidos.

A verificação do significado estatístico também pode ser realizada através do gráfico de Pareto. Nestes gráficos, cada um dos fatores aparece demonstrando como uma barra, cuja magnitude demonstra o quão significativo ele é para o processo. Além disso, somente são considerados fatores relevantes aqueles que apresentam “p” < 0,05. As Figuras 28 e 29 apresentam os gráficos de Pareto para cada uma das respostas consideradas.

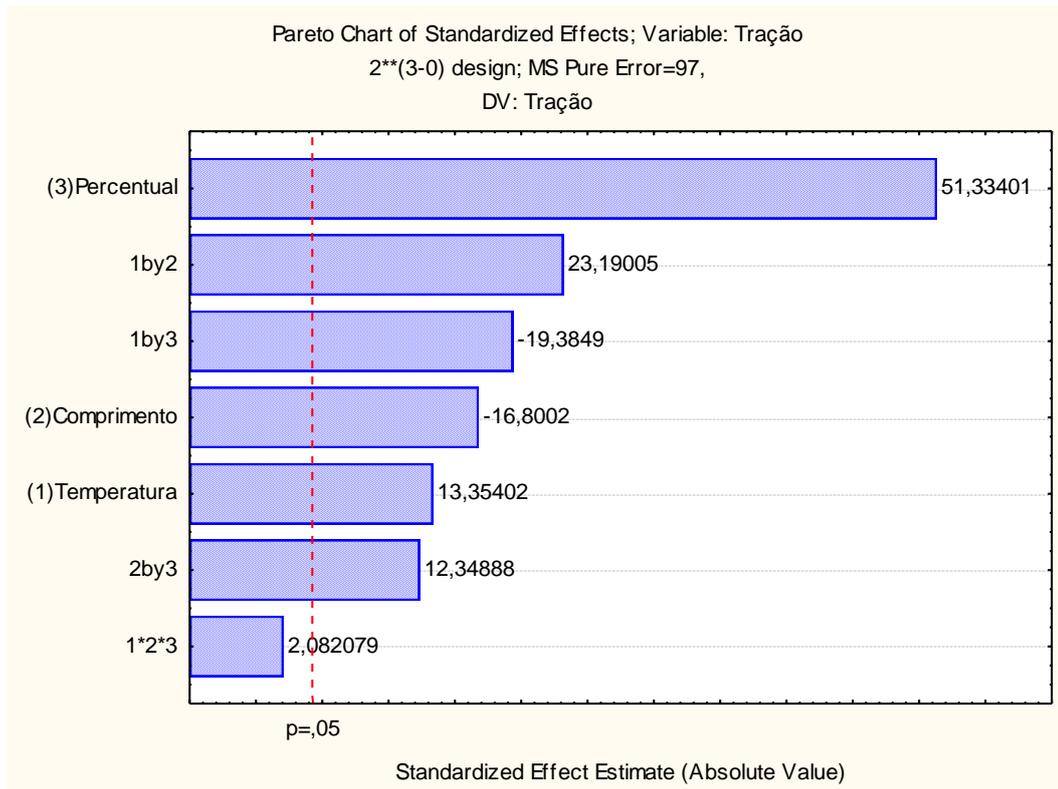


Figura 28. Gráfico de Pareto para a resposta do módulo de elasticidade

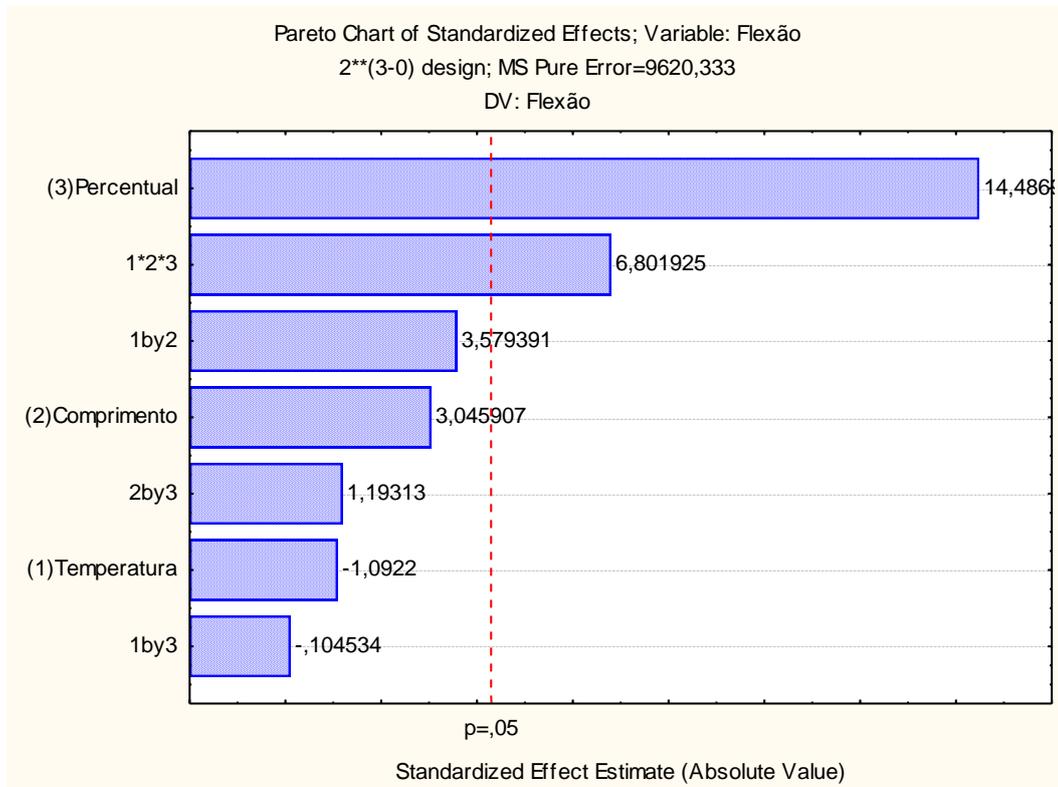


Figura 29. Gráfico de Pareto para a resposta do módulo de resistência sob flexão

Através dos gráficos de Pareto é possível visualizar que, para a resposta do módulo elástico (tração) e do módulo sob flexão, o fator que apresenta maior relevância estatística no processamento dos compósitos é o percentual de fibra presente no compósito. Além disso, o sinal também demonstra se sua influência é direta ou inversamente proporcional.

Ou seja, para o módulo de elasticidade, o fator comprimento apresenta a barra com sinal negativo, o que significa dizer que, quanto maior for o valor do comprimento, para as situações estudadas no processamento, menor será o valor de resposta. Da mesma forma, quanto maior for o percentual de fibra, maior será o valor obtido para o módulo elástico. Assim, a análise desses gráficos permite prever os ajustes no processamento de acordo com os resultados que se deseja obter, para este sistema.

Sendo assim, o parâmetro percentual demonstrou ser o parâmetro mais relevante para ambos os ensaios realizados.

5.3 - OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os resultados obtidos a partir do processamento das formulações nas quais foram variados os teores de carga são mostrados a seguir. A fibra moída, peneirada e seca foi misturada ao polietileno em extrusora. Utilizou-se a ferramenta de planejamento de experimentos para avaliar alguns parâmetros de processamento.

Um parâmetro importante no processamento de compósitos à base de fibra é o tamanho da fibra. Nesse caso, optou-se por utilizar a fração de fibra de menor tamanho, que fica abaixo da peneira de 40 mesh (0,42 mm). No estudo de planejamento de experimentos foi verificado que o tamanho da fibra não mostrou influência nos resultados avaliados, sendo assim, optou-se por manter fixo esse tamanho de fibra.

Segundo Ashori (2008), partículas curtas e finas apresentam uma maior área superficial e são mais facilmente distribuídas ao longo da matriz polimérica apresentando mais homogeneidade ao longo desta matriz em comparação com as partículas longas.

Sendo assim, optou-se por trabalhar com esse tamanho de partícula, somando ao fato de ter apresentado o melhor rendimento no processo de moagem e peneiramento.

Quanto à temperatura ótima de processamento, conforme avaliado no planejamento de experimentos, optou-se por trabalhar na menor temperatura avaliada, pois a mesma não apresentou uma influência considerável nas propriedades mecânicas. Sendo assim, foi utilizada a temperatura de 170 °C para o processamento do compósito.

Como a fibra natural apresentou umidade $11,4\% \pm 0,3$ em massa (item 5.1.3) e segundo Bledzik (1999) um teor elevado de umidade prejudica a dispersão das partículas nos compósitos que tendem a formar agregados durante o processamento, o material foi submetido à secagem em estufa como descrito no item 4.3.2 para evitar esse problema.

Misturas de fibra de bananeira (10, 20, 30 e 40% em massa) e polietileno em extrusora foram feitas e obteve-se perfis em formato de filamentos com aproximadamente 5 mm, que foram picotados.

Por meio de variações crescentes e seqüenciadas na rotação das roscas dos dosadores presentes na extrusora, foram obtidos os valores de massa em função do tempo de aquisição. De posse dos dados de rotação e vazão, as curvas de calibração do tipo vazão (kg/h) *versus* rotação (rpm) foram obtidas (Figuras 30 e 31).

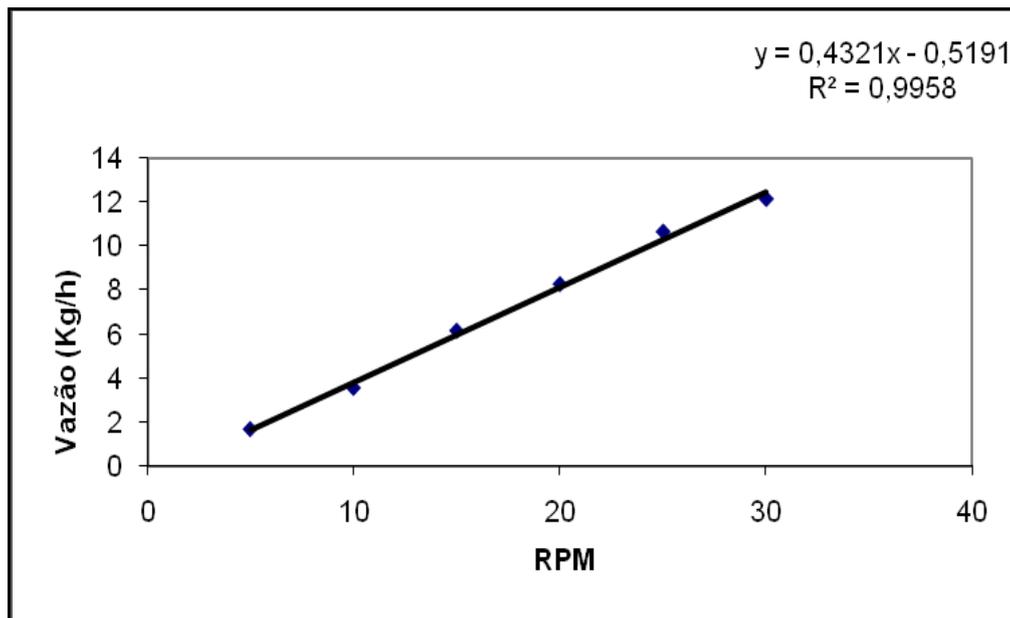


Figura 30: Curva de calibração do alimentador principal: vazão de alimentação do HDPE em função da velocidade da rosca do alimentador principal

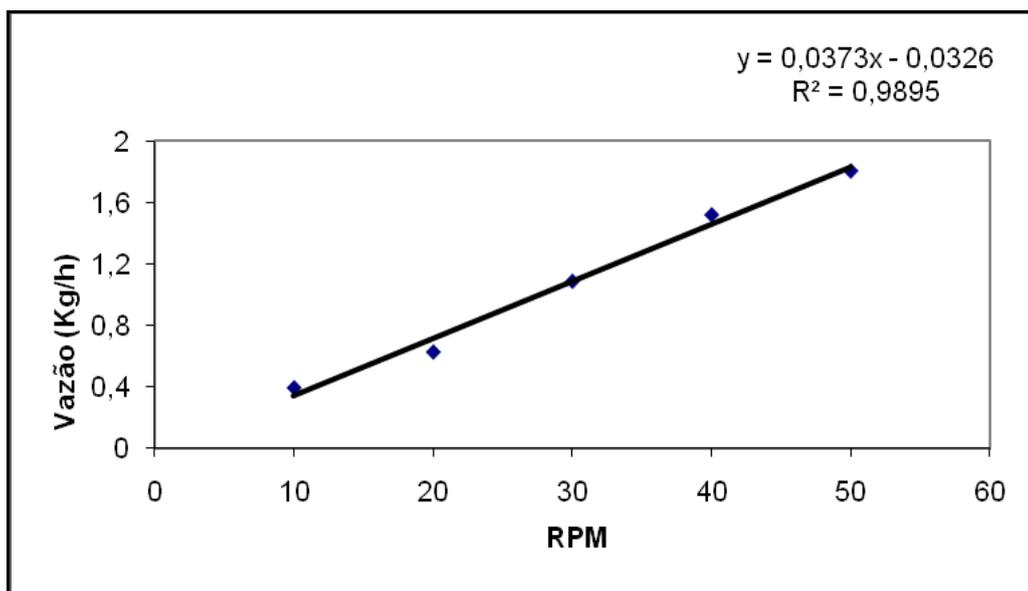


Figura 31: Curva de calibração do alimentador lateral: vazão de alimentação da fibra de bananeira em função da velocidade da rosca do alimentador lateral

Ambas as figuras apresentam boa linearidade, demonstrando um bom grau de confiança para ajuste das frações mássicas que foram processadas ao longo dessa Dissertação.

5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A seguir são apresentados os resultados das propriedades mecânicas das misturas processadas. Foi avaliado o efeito do aumento do teor de fibra nas misturas nas propriedades mecânicas dos materiais.

5.4.1 Propriedades sob tração

As propriedades sob tração avaliadas foram o módulo elástico e força máxima de tração.

5.4.1.1 - Módulo elástico

Os valores encontrados para o módulo sob tração são mostrados na Figura 32. É possível observar que a adição da fibra de bananeira ao HDPE conduz a um acréscimo no módulo de elasticidade de aproximadamente 326, 530, 727 e 732% nos compósitos com 10, 20, 30 e 40% em massa de carga, respectivamente. O polietileno puro apresentou um valor de módulo elástico de 105 MPa.

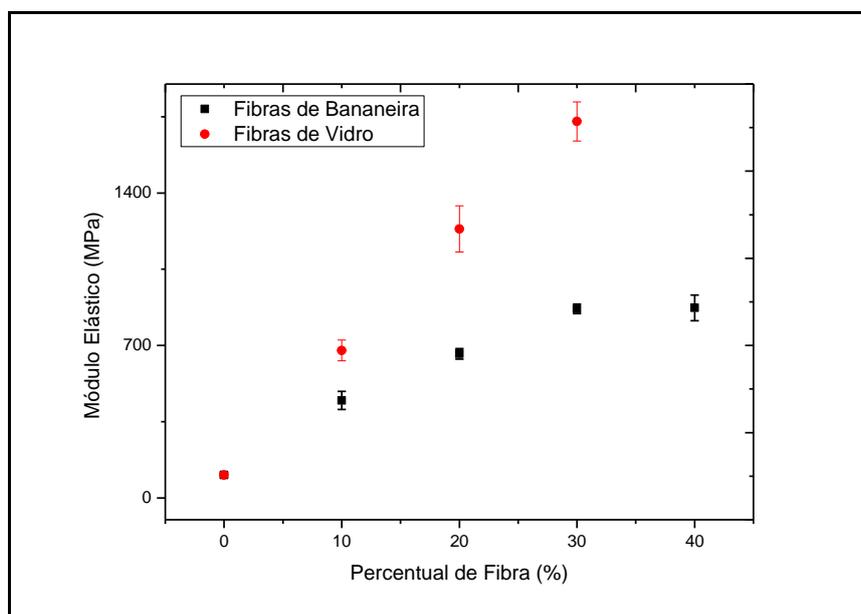


Figura 32. Módulo elástico do HDPE com fibras de bananeira e de vidro em diferentes percentuais em massa

Um fato interessante a se observar na Figura 32 é a formação de um platô após 30% de fibra de bananeira, não apresentando nenhuma melhora no módulo após o aumento deste percentual em massa de 30% de fibra.

Os compósitos de fibra de bananeira, quando comparados com os de fibra de vidro, não apresentam um bom desempenho. Porém, o compósito com 10% de fibra de vidro apresentou valor de propriedade de módulo elástico semelhante ao compósito com 20% de fibra de bananeira.

Comparando resultado com o de outros autores que utilizaram fibras lignocelulósicas, observou-se um ganho acentuado em propriedades em relação a outros trabalhos.

Santos (2008) obteve um ganho de módulo de apenas 54% em relação ao HDPE puro utilizando como agente de reforço a serragem de cedro. Amim (2006) utilizando a fibra de coco verde obteve uma melhora de aproximadamente 94% em relação ao material sem carga de reforço.

5.4.1.2 – Tensão máxima sob tração

A Figura 33 mostra o efeito da adição da fibra de bananeira e da fibra de vidro sobre a resistência à tração de formulações com HDPE.

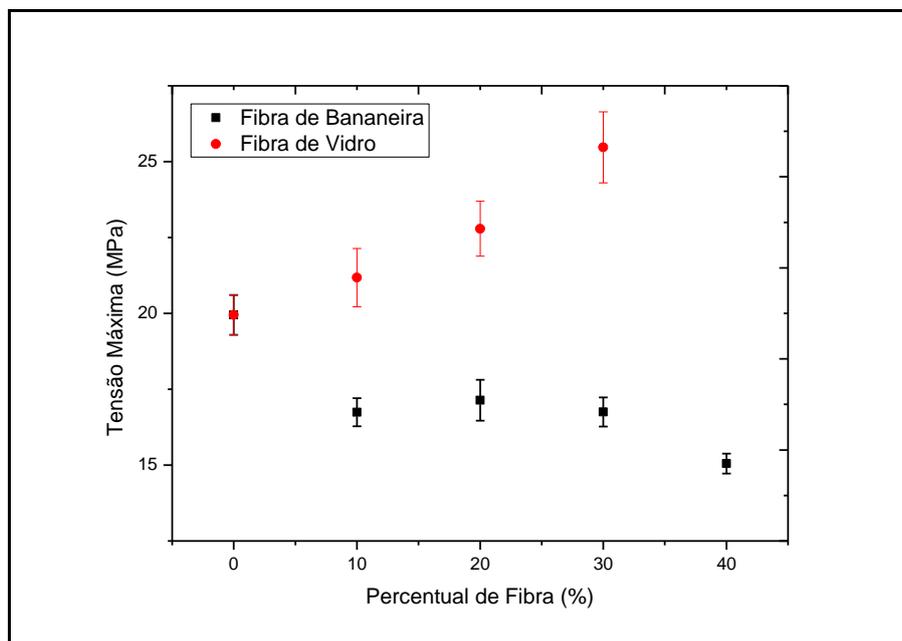


Figura 33. Tensão máxima sob tração do HDPE com fibras de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa.

Os compósitos com fibra de bananeira apresentam valores de tensão máxima abaixo dos compósitos com fibra de vidro.

Os compósitos de fibra natural apresentaram valores de tensão máxima menores que a do HDPE puro (36 MPa). Ao valores diminuíram em aproximadamente 16, 14, 16 e 24 % para as formulações com 10, 20, 30 e 40%*m* em massa de fibra de bananeira, respectivamente.

Nota-se, entretanto, que aumentando o teor em massa de fibra de bananeira de 10%*m* para 20%*m* ou para 30%*m*, praticamente não há variação no valor desta propriedade. Para as misturas contendo teor em fibra de bananeira de 10, 20, 30 e 40%*m*, os valores de tensão foram de $16,7 \pm 0,5$ MPa, $17,1 \pm 0,7$ MPa, $16,8 \pm 0,5$ e $15,1 \pm 0,3$ MPa, respectivamente.

Observa-se no caso da fibra de vidro que teores de 10, 20 e 30%*m* a tensão a tração aumentou 6, 14 e 28% respectivamente, apresentando os valores de $21,1 \pm 1$ MPa, $22,8 \pm 1$ MPa e $25,5 \pm 1,2$ MPa

Resultados semelhantes são citados na literatura, como o de Yamaji (2004), que mostrou em seu trabalho análises de serragem em matriz de polipropileno. O autor verificou que um aumento no teor de serragem de 10 para 30%*m* promoveu uma redução da tensão máxima de tração de 27 MPa para 23,5 MPa. Porém, segundo o autor, esse decréscimo na propriedade estaria relacionado com uma má distribuição da fibra na matriz em função do aumento do teor de carga.

Porém, supõe-se que essa possa não ser a única explicação para a redução de resistência. Segundo Fonseca (2005), o fato da resistência à tração de compósitos plástico-fibras lignocelulósicas diminuírem ou aumentarem estaria relacionado com os diferentes tipos de fibras, processos de tratamentos e técnicas de produção utilizadas. Outro fator pode estar ligado à incompatibilidade entre a matriz poliolefínica apolar e a fibra lignocelulósica polar (SANTOS, 2008).

5.4.2 - Propriedades sob flexão

As propriedades sob flexão analisadas nesse trabalho foram módulo de elasticidade e tensão máxima.

5.4.2.1 - Módulo elástico

Os resultados do módulo de elasticidade para as formulações de fibra de bananeira e fibra de vidro estão expressos na Figura 34.

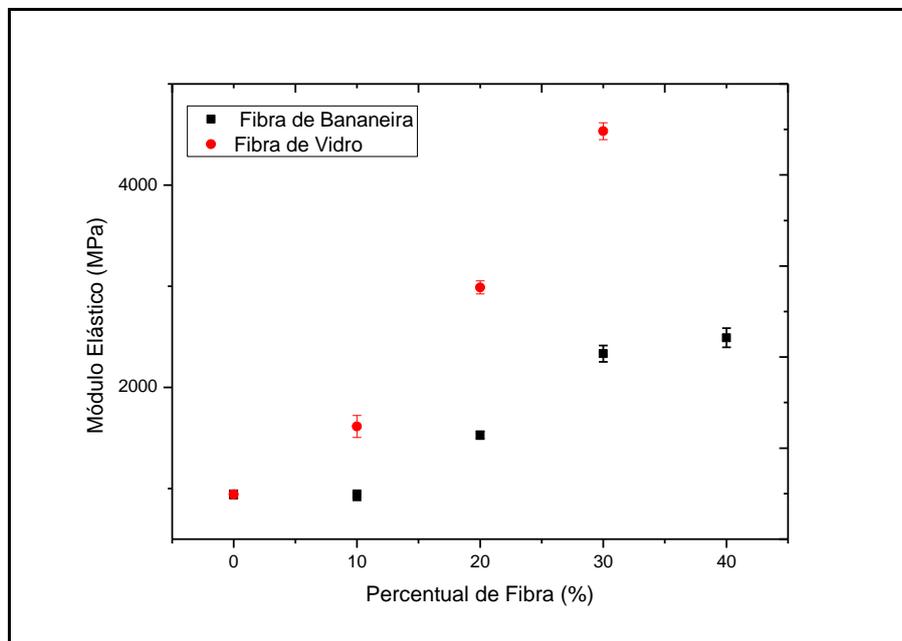


Figura 34. Módulo elástico sob flexão do HDPE com fibras de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa

Analisando-se a Figura 34, nota-se o acréscimo no módulo de flexão promovido pelo aumento do teor da fibra, tanto de vidro quanto de bananeira. Na formulação contendo 10% em massa de fibra de bananeira, praticamente não houve alteração em relação ao HDPE puro.

Para as formulações contendo 20, 30 e 40 % em massa de fibra de bananeira houve aumento de aproximadamente 62%, 147% e 164%, respectivamente, em relação ao polímero puro. O HDPE puro apresentou módulo elástico de 942 ± 39 MPa. Os resultados mostram que a adição da carga de fibra celulósica contribui incisivamente para o aumento do módulo.

Segundo Santos (2008), esse fato sugere que o aumento da concentração de fibra de lignocelulósica reduz a mobilidade das cadeias da matriz polimérica, levando ao aumento no módulo sob flexão dos compósitos. Isto ocorre devido a uma diminuição da capacidade de deformação do material quando submetido à

flexão, afetando a propriedade de maneira inversa como ocorreu com o alongamento na ruptura dos materiais.

Para o caso da fibra de vidro, é possível observar que o aumento de módulo sob flexão se deu de maneira muito mais intensa com uma melhoria de 71, 217 e 381% para os percentuais de 10, 20 e 30% em massa de fibra de vidro, respectivamente.

Traçando-se um comparativo da fibra de bananeira com a fibra de vidro é possível afirmar que para percentuais próximos a 10%*m* de fibra de vidro, a fibra de bananeira pode atuar plenamente como um substituto dessa fibra sintética quando usado com 20%*m*.

Fazendo um comparativo com outros trabalhos que utilizaram fibras lignocelulósicas, observou-se um ganho de propriedade muito próximo.

Santos (2008) utilizando 30% em massa de serragem de cedro obteve um ganho de módulo de 162% em relação ao HDPE puro utilizado, valor muito próximo aos 164% obtidos nessa Dissertação com 40%*m* de fibra de bananeira em massa. Araujo (2008) utilizando 30% em massa de fibra curauá obteve um ganho no módulo de flexão de 150% em relação à matriz de HDPE pura.

5.4.2.2 – Tensão máxima sob flexão

O comportamento da resistência à flexão em função do percentual de fibra de bananeira e fibra de vidro nas formulações com HDPE encontra-se ilustrado na Figura 35.

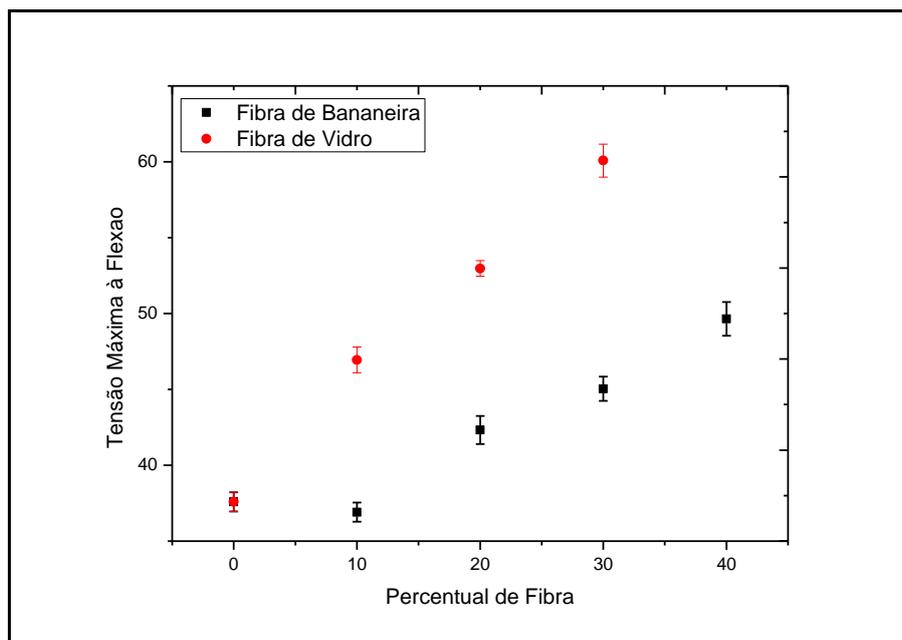


Figura 35. Tensão máxima sob flexão do HDPE com fibra de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa

Em ambas as formulações com fibras de vidro e bananeira ocorreu um acréscimo de resistência, sendo que para a fibra de vidro houve um maior aumento. Na composição contendo 10% em massa de fibra de bananeira ocorreu uma diminuição de aproximadamente 2%, valor insignificativo. Nas composições de 20, 30 e 40 % em massa de fibra de bananeira houve um acréscimo de aproximadamente 13, 20 e 32%, respectivamente, na resistência à flexão dos compósitos.

Para os compósitos com fibra de vidro, os valores de resistência à flexão aumentaram 25, 41 e 60% para as composições com 10, 20 e 30% em massa de carga, respectivamente, em relação ao HDPE.

Comparando-se as formulações de mesmo teor de fibra de bananeira e fibra de vidro, nota-se que apesar da superioridade de resistência gerada pela fibra de vidro para valores maiores que 10% em massa dessa fibra, composições com 40% de fibra de bananeira são plenamente capazes de substituir aplicações que exijam o mesmo valor de tensão máxima.

5.4.3 – Resistência ao impacto

A Figura 36 expressa os resultados de resistência ao impacto dos compósitos com fibra de bananeira e fibra de vidro.

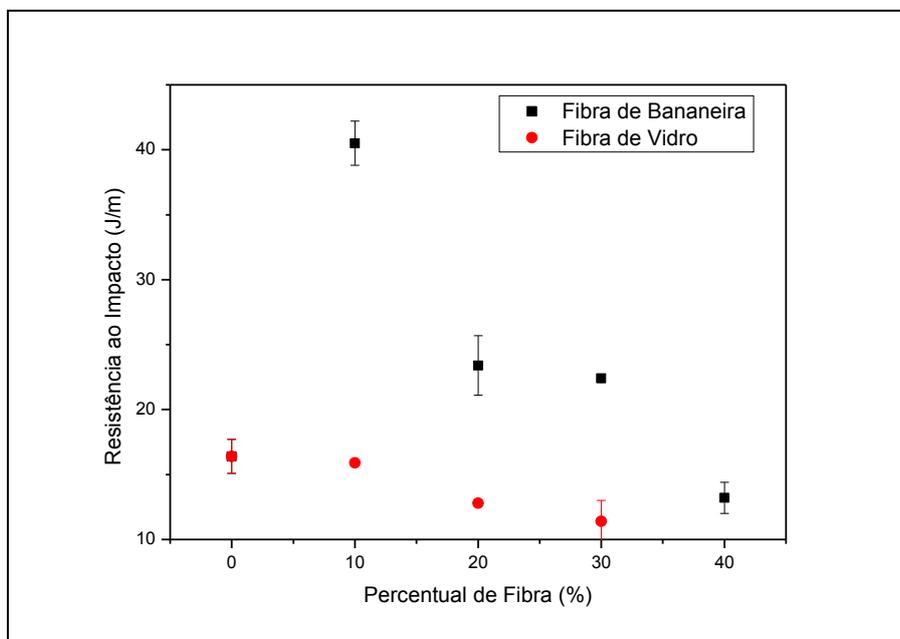


Figura 36. Resistência ao impacto do HDPE com fibra de bananeira e vidro em diferentes percentuais em massa

A adição de fibra de bananeira ao HDPE aumentou a resistência ao impacto do compósito em relação ao polietileno puro. Diferentemente do que aconteceu com a fibra de vidro. É possível observar que no caso da fibra de bananeira, com 10% em massa de fibra há uma melhora em 247% em relação ao HDPE puro, que possui resistência ao impacto de $16,4 \pm 1,3$ J/m.

Para as outras frações de fibra de bananeira há uma melhora discreta de 142 e 136% para as frações de 20 e 30% em massa de fibra na propriedade de resistência ao impacto em relação ao puro.

Somente a fração de 40% em massa de fibra de bananeira apresentou uma redução, em relação ao material puro, de aproximadamente 20%. Segundo Amim (2006), em concentrações elevadas de fibras, pode ocorrer aglomeração entre elas, o que dificultaria a transferência da tensão para fibra, resultando em

propriedades inferiores. No caso dos compósitos com fibra de vidro, houve um decréscimo na resistência ao impacto para todas as frações. Esse efeito pode ser justificado por um reduzido tamanho na fibra.

Comparando os resultados obtidos com os encontrados na literatura, observa-se que usualmente há um decréscimo na resistência ao impacto com o aumento percentual da fibra celulósica. Amim (2006) obteve seu maior valor de resistência ao impacto na fração de 10% em massa de fibra de coco, porém ocorrendo uma diminuição na resistência de 36%.

Araújo (2008) não variou o seu percentual de fibra para o ensaio de impacto, mantendo sempre a fração de 20% em massa de fibra de curauá. Com essa fração observa-se uma redução de 30% em relação ao HDPE puro.

5.5. ENSAIO FÍSICO DO COMPÓSITO

5.5.1 Índice de fluidez

A processabilidade dos compósitos HDPE/fibra de bananeira (FB) foi analisada a partir de dados de índice de fluidez (MFI) que estão apresentados na Tabela 15. Nessa Tabela são apresentados também os resultados dos compósitos a base de fibra de vidro (FV).

Tabela 15. Índice de fluidez dos compósitos HDPE/ fibra de bananeira

Formulação	MFI (g/ 10min)	Desvio Padrão (g/ 10min)
HDPE Puro	5,5	0,2
HDPE+ 10% FB	4,8	0,1
HDPE+ 20% FB	3,7	0,4
HDPE+ 30% FB	2,2	0,2
HDPE+ 40% FB	1,0	0,1
HDPE+ 10% FV	4,6	0,2
HDPE+ 20% FV	3,5	0,1
HDPE+ 30% FV	3,0	0,1

Através desses dados é possível observar que com o aumento percentual da fibra no compósito há uma redução no índice de fluidez desse material o que poderá acarretar em limitações quanto à forma de processar esse compósito. Os decréscimos foram os mesmos tanto para os compósitos com fibra de bananeira quanto para aqueles com fibra de vidro. Dessa forma, parece o que mais interferiu foi a presença de uma carga no polímero que proporcionou a diminuição do MFI.

Esse efeito pode ser justificado por obstruções mecânicas das moléculas por conta da fibra. Segundo Yamane et al (2001), a presença de fibras no fundido e seu parcial desalinhamento afetam significativamente a dinâmica viscoelástica do fundido, dificultando a mobilidade das cadeias moleculares e, portanto, o fluxo.

5.5.2. Densidade

As densidades dos compósitos com fibra de bananeira e fibra de vidro com HDPE são mostradas Tabela 16. Observou-se que com a adição da fibra de bananeira a densidade dos compósitos aumenta. Fato esperado, visto que a densidade do HDPE é igual a $0,93 \text{ g/cm}^3$, enquanto a densidade da fibra de bananeira é igual a $1,08 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 16. Densidade dos compósitos HDPE/ fibra de bananeira

Amostras	Densidade (g/cm^3)	Desvio Padrão (g/cm^3)
HDPE Puro	0,93	0,00
Fibra de Bananeira	1,08	0,05
HDPE+ 10% FB	0,96	0,00
HDPE+ 20% FB	0,97	0,01
HDPE+ 30% FB	1,01	0,01
HDPE+ 40% FB	1,05	0,00
HDPE + 10% FV	0,98	0,01
HDPE + 20 % FV	1,03	0,00
HDPE + 30% FV	1,11	0,00

Trançando-se um comparativo com a densidade obtida entre a fibra de vidro e a fibra de bananeira, foi possível observar que para os mesmos percentuais, os

compósitos com fibra de bananeira apresentaram uma menor densidade, proporcionando assim materiais mais leves que a fibra de vidro.

5.6. ENSAIO MORFOLÓGICO

5.6.1. Microscopia Ótica (MO)

Os compósitos e as fibras de bananeira foram fotografados em microscópio ótico com ampliação de 2,5 X com lente objetiva. A Figura 37 (a) apresenta o compósito com 20% em massa de fibra e a Figura 37 (b) as fotografias para o compósito com 40% em massa de fibra.

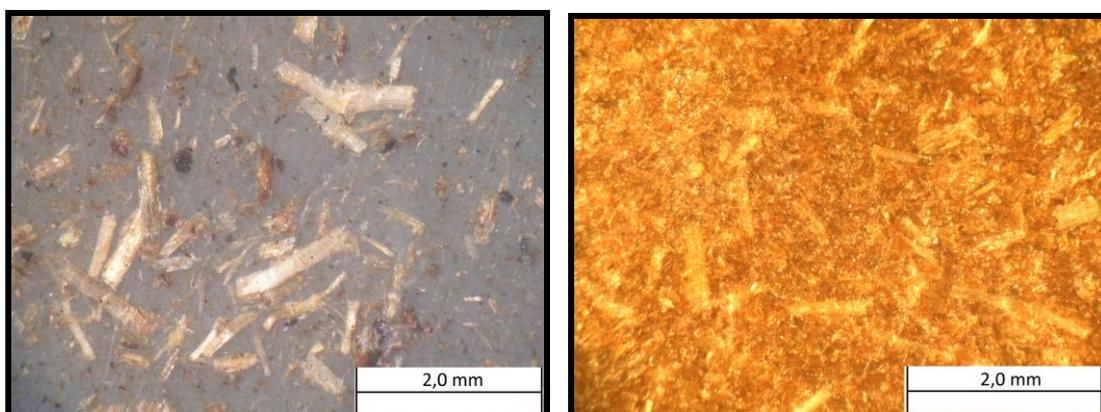


Figura 37. Fotografia por microscopia ótica (a) Compósito com 20% em massa de fibra de bananeira; (b) Compósito com 40% em massa de fibra de bananeira.

Observando a Figura 37, é possível destacar primeiramente a grande diferença de coloração para o compósito com 20% e 40% em massa de fibra. Essa diferença de coloração é justificada por Jones (1998) pelo não encapsulamento da fibra na matriz polimérica, o que gera uma exposição desse material e uma consequente degradação da fibra o que pode acarretar numa maior degradação do compósito com 40%*m* de fibra de bananeira em relação ao compósito com 20%*m*.

Outros fatores que chamam atenção para esse material é a maior quantidade de fibra no compósito de 40%*m*, sendo fácil de observar, porém não tendo como se quantificar essa diferença através dessa técnica.

5.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)

Foram feitas fotomicrografias dos compósitos de fibra de bananeira com percentuais de 20 e 40% em massa de fibra. Na Figura 38 (a) é apresentado o compósito com 20% em massa de fibra e na Figura 38 (b) é apresentado a dispersão da fibra no compósito com 40% em massa de fibra. Observa-se uma rugosidade maior na superfície do compósito com 40% m de fibra.

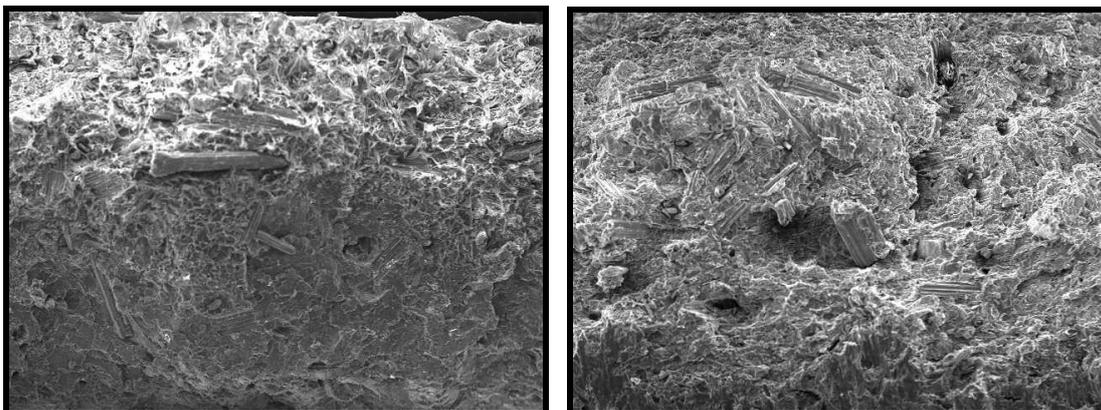


Figura 38. Fotografia por SEM (a) Compósito com 20% de fibra;(b) Compósito com 40% de fibra em massa.

As Figuras 39 (a) e (b) apresentam as fotomicrografias do compósito HDPE/fibra de bananeira na proporção 80/20 em massa. É possível observar um formato cilíndrico de uma fibra com ampliação em 430X. Além disso, através da fotomicrografia da Figura 39 (b), com ampliação em 100X, observa-se que nem todas as fibras estão dispostas no sentido do fluxo. Isso pode gerar uma diminuição do efeito de reforço da fibra (Torres, 2000).

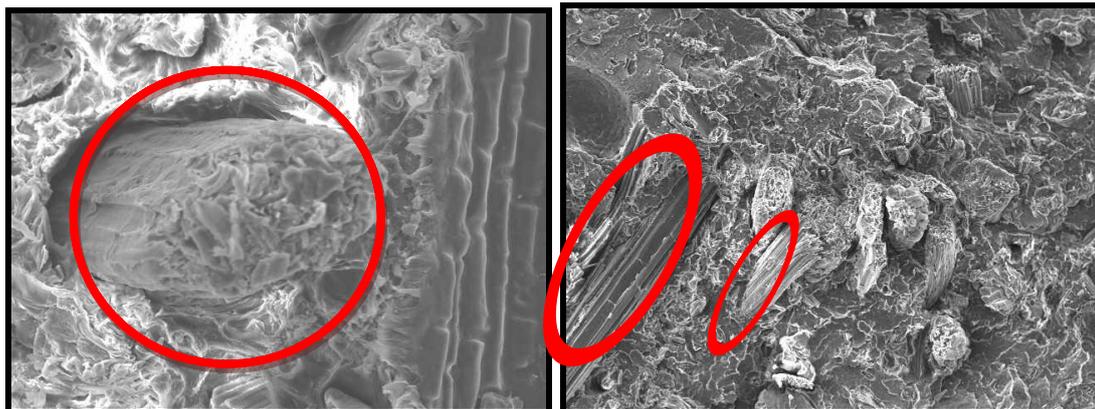


Figura 39. Fotomicrografia do compósito HDPE/fibra de bananeira na proporção 80/20% m/m com fibras em diferentes formas e disposição: (a) Forma cilíndrica da fibra de bananeira; (b) Fibras dispostas no sentido paralelo ao fluxo de injeção.

Na Figura 40 é possível observar a estrutura microfibrilar da fibra de bananeira, apresentando um aspecto no qual as microfibrilas encontram-se aglomeradas formando uma estrutura única.

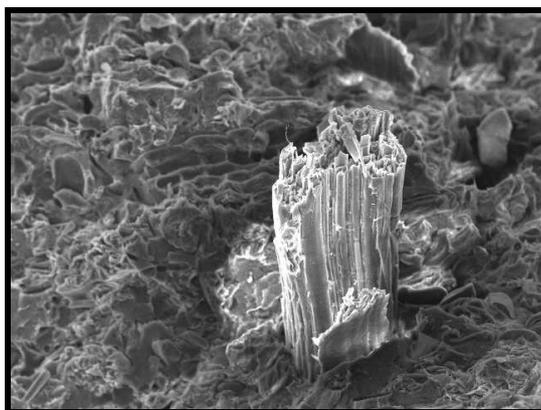


Figura 40. Fotografia por SEM do compósito HDPE/ fibra de bananeira na proporção 60/40 % m/m Microfibrilas da fibra de bananeira;

Na Figura 41, pode-se observar a seção transversal da fibrila da fibra de bananeira que possui formato (a) cilíndrico e (b) triangular.

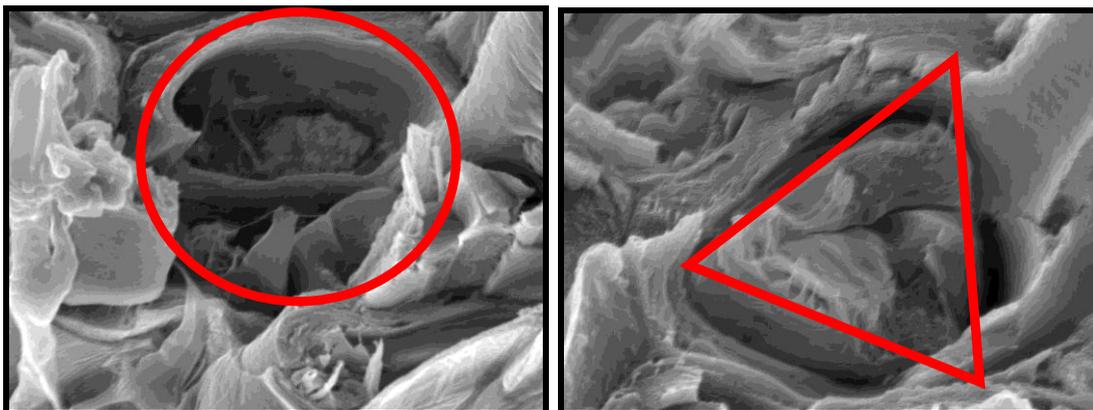


Figura 41. Seção transversal da fibrila em formato (a) cilíndrico e (b) triangular

Aparentemente não se observou o efeito “pull out”, no qual as fibras são arrancadas da matriz durante a fratura, deixando buracos na matriz. Isso ajudaria a justificar o bom ganho de propriedade para essas composições (AGARWAL, 2006).

5.7. ANÁLISE TÉRMICA

Nesta Dissertação a termogravimetria foi usada para avaliar a estabilidade térmica dos compósitos, fornecendo dados sobre a temperatura de degradação térmica (MACHADO, 2004). Também, foram realizados testes de calorimetria diferencial de varredura.

5.1.4 Análise Termogravimétrica (TG)

Devido à fibra natural ser susceptível à degradação quando processada em temperaturas elevada foi fundamental o conhecimento de sua estabilidade térmica (Rodolfo, 2006). O estudo do comportamento térmico da fibra é importante para determinação da temperatura máxima de processamento com a menor perda significativa de sua massa por degradação, o que pode resultar em redução das propriedades dos compósitos (Rodolfo, 2006).

A Figura 42 apresenta a curva termogravimétrica obtida da fibra de bananeira que representa a perda percentual de massa da amostra utilizada nos experimentos com aumento da temperatura.

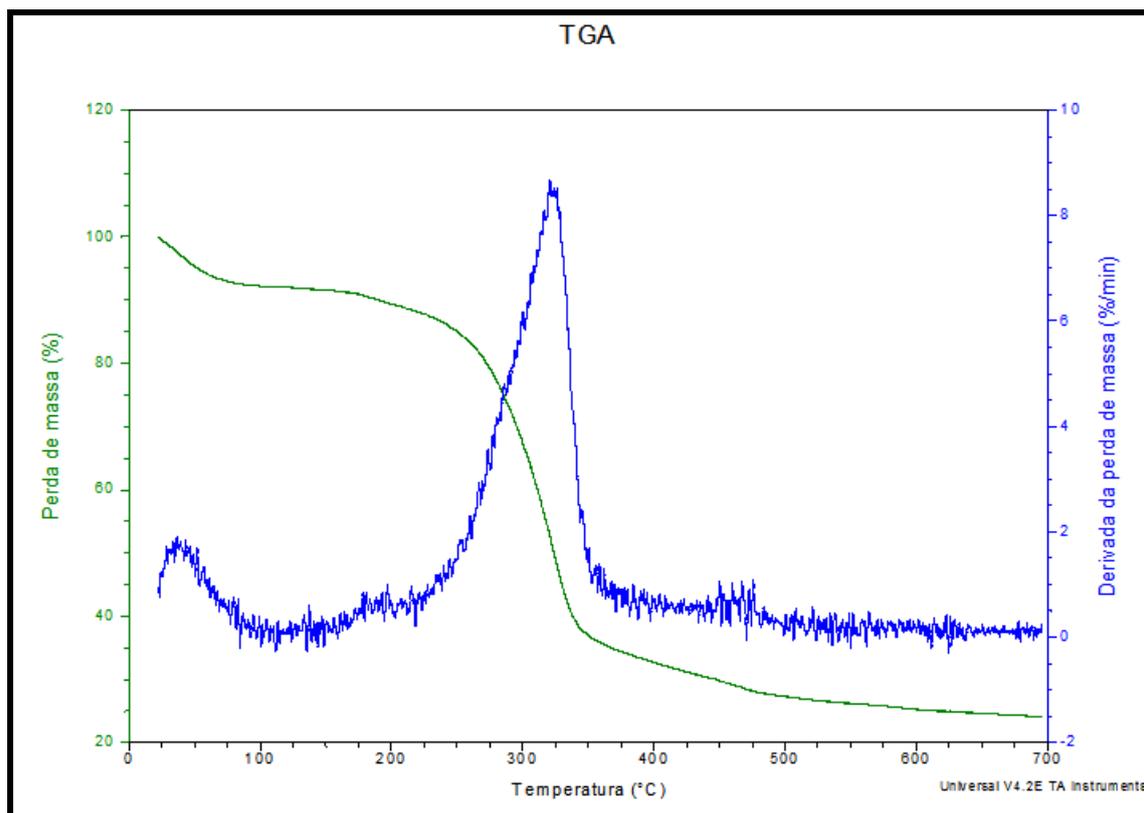


Figura 42. Curva termogravimétrica da fibra de bananeira em presença de N_2

Analisando-se a curva da derivada da Figura 42, observam-se duas perdas de massas que são representadas pelos picos da derivada da curva de TG. A perda de massa inicial, que ocorre em aproximadamente 45° C, é atribuída à perda de materiais voláteis presentes na fibra celulósica. Esses voláteis podem ser terpenos, álcoois, ésteres, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos alifáticos e fenóis (LIU, 2005).

A segunda perda de massa é atribuída à degradação dos componentes da fibra de bananeira. A perda de massa da amostra analisada ficou compreendida entre 225 °C e 400 °C com uma redução significativa de quase 60% em massa, indicando o limite de estabilidade térmica do material nessa temperatura.

Contudo, acima dessa faixa de temperatura, a perda de massa continuou a acontecer, porém de forma menos intensa. A amostra alcançou aproximadamente 76% de redução de sua massa a 700 °C.

Devido a sua natureza amorfa e menos estável, a hemicelulose é considerada um dos componentes, das fibras lignocelulósicas, menos resistente à degradação térmica (AMIM, 2006). Contudo, pela análise da curva de TG (Figura 42) não foi

possível verificar a temperatura na qual termina a degradação da hemicelulose e inicia a da celulose e da lignina.

Isso ocorre por existir sobreposição dos estágios de degradação, o que é atribuído ao fato dos componentes da fibra lignocelulósica degradar-se em faixas de temperaturas sobrepostas (Santos, 2008).

Kim e colaboradores (2004) encontraram como resultados de análises termogravimétricas em casca de arroz uma faixa de temperatura de degradação da hemicelulose entre 150 °C e 350 °C, da celulose entre 275 °C e 350 °C e da lignina entre 250 °C e 500 °C.

A Figura 43 apresenta as degradações térmicas da fibra de bananeira, além do compósito de fibra de bananeira com HDPE nas proporções de 20 e 40 % em massa de fibra e o HDPE puro.

Observa-se que a degradação do HDPE puro iniciou em aproximadamente 400°C. Como as poliolefinas são constituídas apenas de carbono e hidrogênio, o resíduo de sua degradação é próximo de zero.

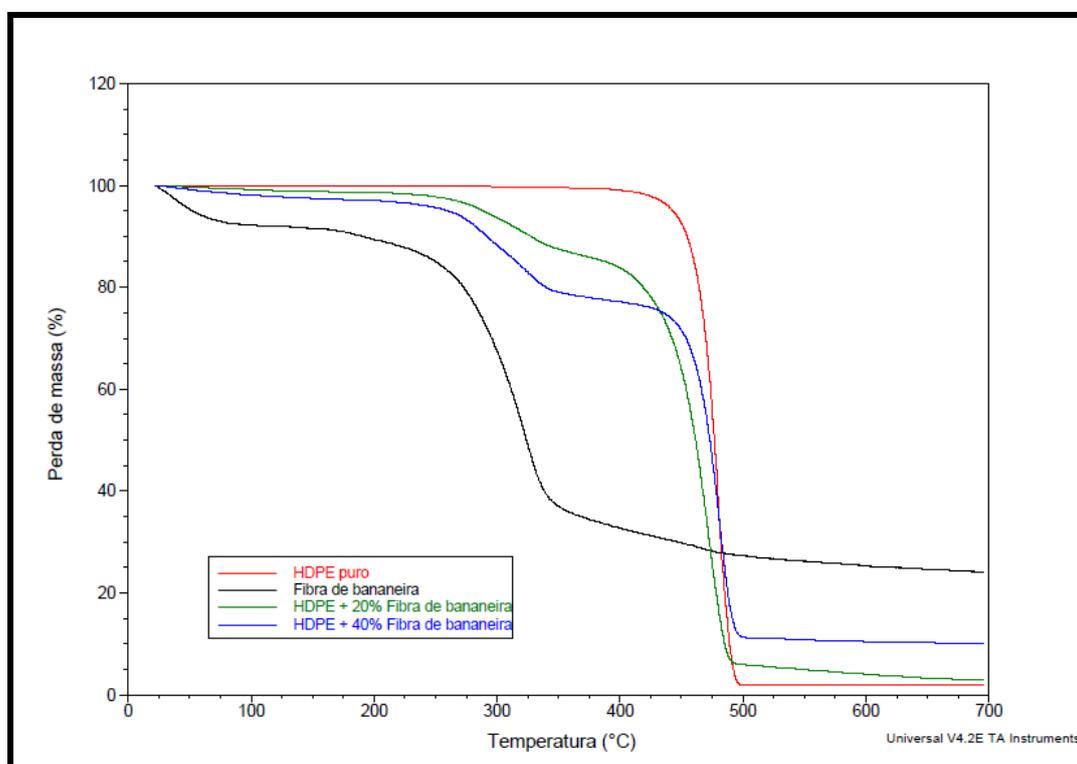


Figura 43. Curva termogravimétrica do HDPE puro, da fibra de bananeira e do compósito de HDPE com 20 e 40 % em massa de fibra de bananeira

A degradação dos componentes relativos à fibra inicia-se em aproximadamente 200°C, indicando o limite de estabilidade térmica da fibra nessa temperatura. As curvas das derivadas são apresentadas na figura 44.

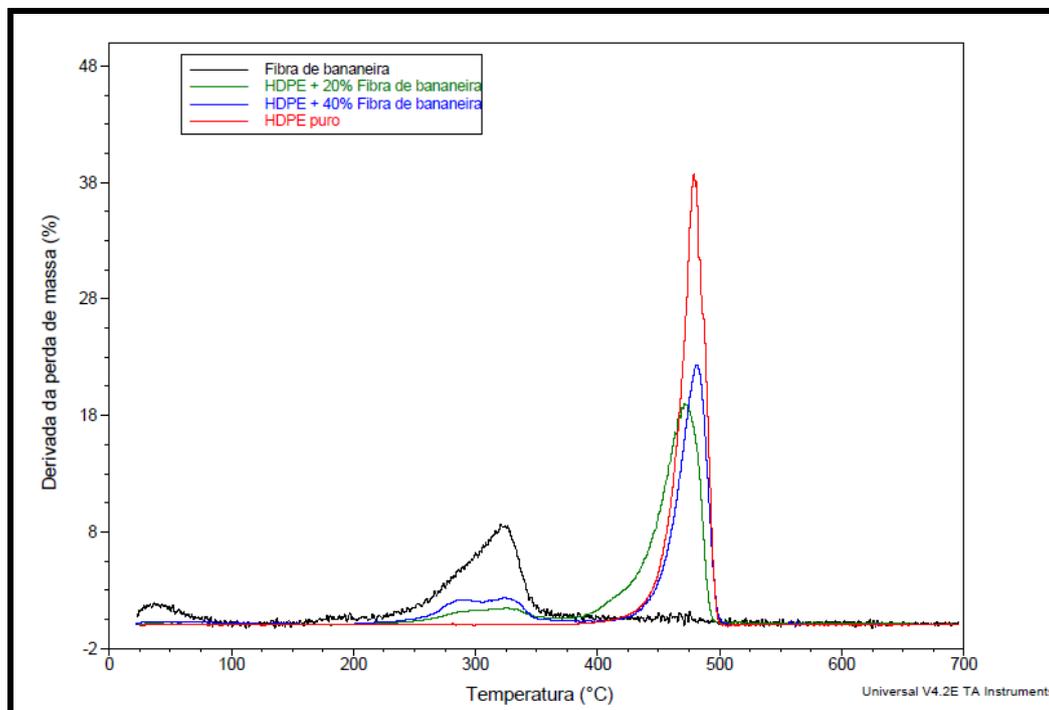


Figura 44. Derivada da curva termogravimétrica do HDPE puro, da fibra de bananeira e do compósito de HDPE com 20 e 40 % em massa de fibra de bananeira

Como é possível observar, o HDPE puro apresenta um único pico, próximo a 470°C, pois há somente uma única estrutura para se degradar. No caso do compósito fica bem caracterizado, com a sobreposição das curvas das derivadas dos polímeros analisados, que primeiramente ocorre a degradação da fibra e, posteriormente, a degradação do polímero, porém sem um deslocamento considerável dessas temperaturas de degradação.

5.8. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA

Na Tabela 16 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios de DSC. Foram utilizados os dados relativos ao segundo aquecimento e segundo resfriamento. É possível observar pelos dados que não há variações expressivas

na temperatura de fusão (T_m) nem na temperatura de cristalização no resfriamento (T_{cc}). Porém com a adição da fibra de bananeira houve um acréscimo no grau de cristalinidade (X_c).

Tabela 17. Temperaturas de fusão e cristalização e grau de cristalinidade de HDPE e mistura de HDPE/fibra de bananeira nas proporções 80/20 e 60/40% m/m

Amostra	T_m (°C)	T_{cc} (°C)	X_c (%)
HDPE puro	131	116	59
HDPE/ 20% fibra de bananeira	131	115	65
HDPE/ 40% fibra de bananeira	131	116	73

T_m - Temperatura de fusão; T_{cc} - Temperatura de cristalização no resfriamento; X_c - Grau de cristalinidade.

A temperatura de fusão cristalina pode ser influenciada pela presença da carga celulósica, contudo não foram observadas diferenças para as misturas com diferentes teores de fibra. (PASQUINI, 2008).

O aumento de X_c para os compósitos com fibra sugere que as fibras podem ter atuado como agentes nucleantes. Segundo Carreira (2009), é sabido que a presença de cargas ou impurezas em polímeros leva a cristalização, com formação de cristais em torno desta, resultante da adsorção de segmentos moleculares na superfície de partículas estranhas ao sistema, caracterizando um ponto de nucleação. Sendo assim, é possível que as fibras tenham atuado como agentes nucleantes aumentando, assim, o grau de cristalinidade do compósito.

5.9. COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA PLÁSTICA E DO COMPÓSITO HDPE/ FIBRA DE BANANEIRA

Existem diversos tipos madeira plástica com composições e propriedades distintas. Algumas propriedades mecânicas dessas madeiras plásticas estão apresentadas na Tabela 17, onde estão presentes também as propriedades dos compósitos de HDPE e fibra de bananeira, obtidos nessa Dissertação.

Comparando-se as propriedades mecânicas dos materiais nota-se que em alguns casos os compósitos com fibra de bananeira apresentaram desempenho muito próximo ou superior ao dos produtos comerciais. Sendo assim, é possível afirmar que o compósito a base de fibra de bananeira apresenta grande potencial para uso nesse tipo de aplicação.

Tabela 18. Módulo sob tração e sob flexão obtidos nesse trabalho e em algumas madeiras plásticas comerciais

Composição	Módulo sob flexão (MPa)	Módulo sob tração (MPa)
HDPE/ 30% m/m fibra de bananeira (resultado deste trabalho)	2334	868
HDPE/ 40% m/m fibra de bananeira (resultado deste trabalho)	2491	873
HDPE/50% m/m fibra de MDF ¹	1550	953
HDPE/fibra de vidro ²	3102	-
Resíduo Plástico/ serragem ³	1000	1100

1-HILLIG (2006), 2- TRIMAX (2010), 3- CARROLL (2001)

6 – CONCLUSÕES

A utilização da fibra de bananeira em compósitos a base de HDPE permite obter ganhos significativos nas propriedades mecânicas em comparação ao polímero puro. Dentre as propriedades mecânicas estudadas, a que mais sofreu influência da adição da fibra de bananeira foi o módulo elástico sob flexão, que alcançou um aumento de aproximadamente 164% para o compósito com 40% em massa de fibra de bananeira em relação ao módulo do HDPE puro.

Outra propriedade que obteve ganho considerável foi a resistência ao impacto que obteve um ganho de 135% em relação ao polímero puro quando foi adicionado 10% de fibra de bananeira.

A utilização de percentuais muito altos de fibra de bananeira dificulta muito o processamento, pois a viscosidade do meio é afetada, ocorrendo uma redução com o aumento percentual das fibras. Com a utilização do compósito contendo 30% em massa de fibra de bananeira foi possível obter ganhos de propriedades próximos ao percentual de 40% de fibra porém com uma viscosidade mais fácil de operar o equipamento. Deste modo pode-se concluir que, dependendo da propriedade mecânica, com a adição da fibra de bananeira já seria possível obter bons resultados para as propriedades dos compósitos, tornando-se uma alternativa ao uso da fibra de vidro.

Sobre a estabilidade térmica do material, é possível observar que os compósitos apresentaram início de degradação em temperaturas intermediárias entre a fibra de bananeira (temperatura menor) e o HDPE (temperatura maior).

A cristalinidade do material foi aumentada, sugerindo a atuação das fibras como agente nucleante. Porém por não ter ocorrido variações na temperatura de fusão cristalina o tamanho dos domínios cristalinos não sofreu alteração na matriz.

7 – SUGESTÕES

Para a continuidade deste trabalho, as seguintes sugestões são oferecidas

- Realizar testes de deformação térmica (HDT), além de outros testes realizados na madeira plástica como arrancamento de parafuso e absorção de água.
- Utilizar compatibilizantes para melhorar a relação entre fibra e matriz.
- Realizar tratamento químico na fibra.
- Utilizar uma matriz polimérica reciclada ou um material pós-consumo.
- Teste de envelhecimento.

8 – REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 256-06a**: Determining the Izod pendulum impact resistance of plastics, West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638-03**: Standard test method for tensile properties of plastics, West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790-03**: Flexural properties of unreinforced and reinforce plastics electrical insulating materials, West Conshohocken, 2007.

AMIM, P. R. P. Estudo de misturas de HDPE e fibra de coco como mecanismo de desenvolvimento limpo para utilização em madeira plástica. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. 2006.

ARAÚJO, J.R.; WALDMAN, W.R., DE PAOLI, M.A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. **Polymer Degradation and Stability**. v 93. p. 1770–1775. 2008.

ARIB,R.M.N.; SAPUAN, S.M.; AHMAD, M.M.H.M.; PARIDAH, M.T.; ZAMAN K.H.M.D. Mechanical properties of pineapple leaf fibre reinforced polypropylene composites. **Materials and Design**. v. 27. p. 391–396. 2006.

BALZER, P. S.; VICENTE, L. L.; BRIESEMEISTER, R.; BECKER, D.; SOLDI, V.; RODOLFO JR., A.; FELTRAN, M. B. Estudo das propriedades mecânicas de um composto de PVC modificado com fibras de bananeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. . v.17 n. 1. 2007.

BILLMEYER, F. W. J. – “**Textbook of Polymer Science**” – John Wiley & Sons - Interscience, USA. 1984.

BONELLI, C. M. C.; ELZUBAIR, A.; SUAREZ, J. C. M.; MANO, E. B. Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno

de alta densidade reciclado com fibra de piaçava. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v.15 n. 4. p. 256-260. 2005.

BRODY, A.L., MARSCH, K.S.; “**Enciclopedia of Packaging Technology**”; John Wiley & Sons - Interscience, Canadá, (Segunda edição), 1997.

CANEVAROLO JR. S. V. **Ciência dos Polímeros**, Artliber: São Paulo, 2002.

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

COUTINHO, F. M. B., MELLO, I.L., MARIA, L. C. S. - Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

ESMERALDO, M. A. Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal do Ceará. 2006.

ESPM/SEBRAE. Estudo de mercado: BANANA. **Série Mercado**. 2007.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure and reactions. **Walter de Gruyter: Berlin & New York**. 615 p. 1989.

FERNANDES, Moacyr Saraiva. Indústria brasileira das frutas: novos mercados para citrus e outras frutas brasileiras. São Paulo. 26 p. [material de apresentação de conferência]. Disponível em:
<http://www.iac.sp.gov.br/Centros/citros/Palestra%20WIPC/29_09_2004/1400%20Moacyr%20Saraiva%20Fernandes.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2009.

GARBASSI, F.; MORRA, M. OCCHIELLO, E. Polymer Surfaces: from physics to technology. **John Wiley & Sons**, England, 2ª reimp, cap. 6, 462 p. p. 344-345. 1996.

GEETHAMMA V.G.; KALAPRASAD G.; GROENINCKX G., THOMAS S. Dynamic mechanical behavior of short coir fiber reinforced natural rubber composites. **Composites: Part A**. v. 36, p. 1499-1506, 2005.

HAINES, P.J.; HEAL, G. R. Principles of thermal analysis and calorimetry. **Royal Society of Chemistry Paperbacks**. Cap 2. UK. 2002.

HAINES, P.J.; HEAL, G. R. **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry**. Royal Society of Chemistry: Cambridge. xiv. p. 220. 2002.

HAMID, S. H., ATIQUULLAH, M. Role of blending technology in polyethylene recycling. **Polymer Reviews**, v. 35, p. 495-515, 1995.

HILLIG, E. Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras. 2006. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Paraná, PR, 2006.

HIROCE, R. O Aproveitamento do pseudocaule. **O Estado de São Paulo**, 19 mar. 1972. Suplemento Agrícola 877, p.11.

IBRAHIM, M. M.; DUFRESNE, A.; EL-ZAWAWY, W. K; AGBLEVOR, F. A. Banana fibers and microfibrils as lignocellulosic reinforcements in polymer composites. **Carbohydrate Polymers**. v. 81, p. 811-819. 2010.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Anuário Estatístico do Brasil**. v. 58, p.3 -26, 1998.

ISHIZAKI, M.H.; VISCONTE, L.L.Y.; FURTADO, C.R.G.; LEITE, M.C.A.M.; LEBLANC, J.L. Caracterização Mecânica e Morfológica de Compósitos de Polipropileno e Fibras de Coco Verde: Influência do Teor de Fibra e das Condições de Mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.. 16, n. 3, p. 182-186. 2006.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**. v. 71. p. 343–364. 2008.

JOSEPH, A., SREEKALA M.S., OOMEN Z., KOSHY P., THOMAS S.A. A comparison of the mechanical properties of phenol formaldehyde composites reinforced with banana fibre and glass fibres. **Composites Science and Technology**, v. 62, p. 1857-68, 2002.

JOSEPH, P. V.; JOSEPH, K.; THOMAS, S.; PILLAI, C. K. S.; PRASAD, V. S.; GROENINCKX; SARKISSOVA, M. The thermal and crystallization studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 34. p. 253-266.2003.

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

LI, X.; LOPE, G., TABIL, PANIGRAHI, S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. **Journal of Polymers and the Environment**. v. 15. p. 25–33. 2007.

LIU, H.; WUQ, Q.; ZHANG, Q. Preparation and properties of banana fiber-reinforced composites based on high density polyethylene (HDPE)/Nylon-6 blends. **Bioresource Technology**. v. 100, p. 6088-6097. 2009.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. E. C. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica**. RJ: E-papers, 2001. 366 p. 217-222.

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

MALKAPURAM, R.; KUMAR, V.; NEGI, Y. S. Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. n. 00. 2008.

MALLICK, P.K. **Fiber-reinforced composites**: materials, manufacturing and design. New York, Marcel Dekker, 1988. 312p.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 197 p. p. 48, 111, 112, 115-119. 2003.

MARQUES DE SÁ, J. P. **Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R**. 2nd ed., 506 p. 2007.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. Composite materials:engineering and science. **Great Britain**. Chapman & Hall. 470 p. 1994.

MOHAN, D.; PITTMAN, C.U.; STEELE, P.H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. **Energy Fuels**. v. 20. n. 3. p. 848-889. 2006.

MUELLER, D.H.; KROBJILOWSKI, A. New discovery in the properties of composites reinforced with natural fibers. **Journal of Industrial Textiles**. v. 33. n. 2. 2003.

MUTJÉ, P.; LÓPEZ, A.; VALLEJOS, M.E.; LÓPEZ, J.P.; VILASECA, F. Full exploitation of Cannabis sativa as reinforcement/filler of thermoplastic composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 38. p. 369-377. 2007.

ODIAN, G. – “**Principles of Polymerization**”, John Wiley & Sons - Interscience, New York. 1991.

OLIVEIRA, I. T. D. Avaliação mecânica de compósitos de polietileno de alta densidade (pead) e vermiculita. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

OSMA, M.A., RUPP, J. E. P.; SUTER, U. W. Tensile properties of polyethylenelayerd silicate nonocomposites; **Polymer** **46**, 1653-1660, 2005

PAN, N.; CHEN, H.C.; THOMPSON, J.; INGLESBY, M.K.; KHATUA, S.; ZHANG, X.S.; ZERONIAN, S.H. The Size Effects on the Mechanical Behaviour of Fibres. In YUAN, Q.; WU, D.; GOTAMA, J.; BATEMAN, S. Wood fiber

reinforced polyethylene and polypropylene composites with high modulus and impact strength. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**. v. 21. p. 195-208. 2008.

PIETAK, A.; KORTE, S.; TAN, E.; DOWNARD.; STAIGER, M. P. Atomic force microscopy characterization of the surface wettability of natural fibres. **Applied Surface Science**. v. 253. p. 3627–3635. 2007.

POTHAN L. A.; OOMMEN, Z.; THOMAS S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composite. **Composites Science and Technology**. v. 63. p. 283-293. 2003.

RABELLO, M. **Aditivação de Polímeros**. SP: Artliber, 242 p. Cap. 10. 185-193. 2000.

RAZERA, I. A. T. Estudo de propriedades de compósitos de matriz termorrígida fenólica reforçados com fibras de juta. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

RAZERA, I. A. T. Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica. **Tese de doutorado**. Universidade de São Paulo. 2006.

REN, J.L.; SUN, R.C.; PENG, F. Carboxymethylation of hemicelluloses isolated from sugarcane bagasse. **Polymer Degradation and Stability**. v. 93. p. 786-793. 2008.

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

ROWELL, R. M.; SANADI, A. R.; CAULFIED D. F.; JACOBSON R. E. Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. In: **LIGNOCELLULOSIC-Plastics Composites**. São Paulo, USP/UNESP, 1997.p. 23-51.

ROZMAN, H.D.; TAN, K.W.; KUMAR, R. N.; ABUBAKAR, A.; ISHAK, Z.A.M.; ISMAIL, H. The effect of lignin as compatibilizer on the physical properties of coconut fiber-polypropylene composites. **European Polymer Journal**, v. 36,n. 7, p. 1483-94, 2000.

SAIN, P. M.; LAW, S.S.; BOUILLLOUX, A. Interface Modification and Mechanical Properties of Natural Fiber–Polyolefin Composite Products. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. v. 24, n. 2. 2005.

SANTOS, M. S. Propriedades Térmicas e mecânicas de materiais reciclados à base de PET pós-consumo e cargas de coco. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2002.

SANTOS, F. A. Estudo de misturas de HDPE e serragem de cedro para obtenção de madeira plástica. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2008.

Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas (SBRT). **Beneficiamento da fibra da bananeira**. Disponível em: <http://www.respostatecnica.org.br>. Acesso em: 27/01/2010.

SILVA, F.A.. Tenacidade de materiais compósitos não convencionais. **Dissertação de Mestrado**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K. ; MUNIZ, E. C. ; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**. v. 32. n. 3, p. 661-671, 2009.

SOFFNER , M. L. A. P.; Produção de polpa celulósica a partir de engaço de bananeira. **Dissertação de mestrado**. Universidade de São Paulo. Piracicaba. São paulo. 2001.

SOTO BALLESTERO, M. Bananos: cultivo y comercialización. 2.ed. **San José: Litografía e Imprenta LIL**, 1992. 674p.

TECNOLOGIA PRODUZ MADEIRA PLÁSTICA. **Revista Plástico Moderno**, p.18, nov. 2000. Disponível em:
<<http://www.plastico.com.br/revista/pm315/extrusoras4.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2010.

TRIMAX. Structural Large Profiles Technical Data. Disponível em:
<http://www.trimaxbp.com/_files/TrimaxStructuralLargeProfilesTechnicalData.pdf>. Acesso em 10 de fevereiro de 2010.

XUE, Y.; VEAZIE, D.R.; GLINSEY, C.; HORSTEMEYER, M. F.; ROWELL, R.M. Environmental effects on the mechanical and thermomechanical properties of aspen fiber–polypropylene composites. **Composites: Part B: Engineering**. v. 38. p.152–158. 2007.

YAMAJI, F. M. Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira. **Tese (Doutorado em Ciências Florestais)**. Universidade Federal do Paraná, PR, 2004.

YU, Y.; LOU, X.; WU, H. Some Recent Advances in Hydrolysis of Biomass in Hot-Compressed Water and Its Comparisons with Other Hydrolysis Methods. **Energy Fuels**. v. 22. n. 1. p. 46-60. 2008.

YUAN, Q.; WU, D.; GOTAMA, J.; BATEMAN, S. Wood Fiber Reinforced Polyethylene and Polypropylene Composites with High Modulus and Impact Strength. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**. v. 21. p. 195-208. 2008.

ZÁRATE E. N.; ARANGUREN M. I.; REBOREDO M. M. Resol/Vegetable fibers composites, **Journal of Applied Polymer Science**, v.25. p. 1354-1362, 1999.

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

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

SILVA, C. X. Estudo dos efeitos da configuração da extrusora de rosca dupla sobre a morfologia e propriedades de nanocompósitos de polietileno e montmorilonita. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2010.

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

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

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

TORRES, N.; ROBIN, J. J.; BOUTERIN, B. Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding, **European Polymer Journal**, v. 36. p. 2075-2080. 2000.

YAMANE, H.; ZHANG, W.; KOMOTO, S.; TAKAHASHI, M.; WHITE, J. L. Biaxial extensional flow behavior and fiber dispersion and orientation in short glass fiber filled polypropylene melts. **Journal of the Society of Rheology**. v. 29. p. 111-120. 2001.

MACHADO, L.D.B. Análise térmica termogravimetria. In: CANEVAROLO JUNIOR., S.V., (Ed.). **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber. p.209-228. 2004.

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.

BORGES, L. M. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* tratado termicamente. **Revista da madeira**, n. 89. 2005.

SEYE, O.; CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O. “Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos” **Encontro de Energia no Meio Rural - AGRENER**. Ano 3, set 2000.

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

CARREIRA, L.G. Misturas poliméricas PET/PC reforçadas com fibras de vidro curtas. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2009.

HILLIG, E. Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Paraná, PR, 2006.

TRIMAX. Structural Large Profiles Technical Data. Disponível em: <http://www.trimaxbp.com/_files/TrimaxStructuralLargeProfilesTechnicalData.pdf>. Acesso em 10 de fevereiro de 2010.

CARROLL, D. R.; STONE, R. B.; SIRIGNANO, A. M.; SAINDON, R. M.; GOSE, S. C.; FRIEDMAN, M. A. Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks. **Resources, Conservation and Recycling**, vol.31, no.3, p.241-251, 2001.

Jones R. “Guide to short fiber reinforced plastics”. **Hanser/Gardner Publications**, Ohio, 1998.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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