

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS**

**COMPÓSITOS DE PEBD COM FIBRAS DE PAPEL RECICLADO DE
EMBALAGENS CARTONADAS LONGA VIDA**

Lilian Antunes Pinto

Ponta Grossa

2013

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS**

**COMPÓSITO DE PEBD COM FIBRAS DE PAPEL RECICLADO DE EMBALAGENS
CARTONADAS LONGA VIDA**

Lilian Antunes Pinto

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciência de Materiais como
requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

Orientador: Dr. Benjamim de Melo Carvalho

Co-orientador: Dr. Luís Antonio Pinheiro

Ponta Grossa

2013

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

P659 Pinto, Lilian Antunes
Compósito de PEBD com fibras de papel reciclado em embalagens cartonadas longa vida/ Lilian Antunes Pinto. Ponta Grossa, 2013.
84 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais - Área de Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Benjamim de Melo Carvalho.

Coorientador: Prof. Dr. Luís Antonio Pinheiro.

1. Embalagens longa vida pós-consumo. 2. Fibra de papel. 3. Compósito. I. Carvalho, Benjamim de Melo. II. Pinheiro, Luís Antonio. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais. IV. T.

CDD: 620.197


TERMO DE APROVAÇÃO

LILIAN ANTUNES PINTO


COMPÓSITO DE PEBD COM FIBRAS DE PAPEL RECICLADO DE
EMBALAGENS CARTONADAS LONGA VIDA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Orientador :


Prof. Dr. Benjamim de Melo Carvalho
Depto de Engenharia de Materiais, UEPG/PR


Prof. Dr. Osvaldo Mitsuyuki Cintho
Depto de Engenharia de Materiais, UEPG/PR


Prof.^a Dr.^a Denise Milléo Almeida
Depto Acadêmico de Alimentos, UTFPR/PR

Ponta Grossa, 30 de julho de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, em especial meu filho Victor Leandro, que suportou minha ausência, a minha mãe Marly que me apoiou em todos os momentos e ajudou a cuidar do Victor e a meu marido Armando que além de apoio me ajudou tecnicamente discutindo alguns aspectos do trabalho.

VITAE DO CANDIDATO

Engenheira de Segurança do Trabalho (2009).

Especialista em Gestão Ambiental (2009).

Engenheiro de Materiais pela UEPG (2004).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o ser supremo que me deu mais esta oportunidade.

A todos que me apoiaram e tiveram paciência nos momentos em que estive ausente.

Aos Srs. Fernando VonZuben e Fernando Neves que apoiaram a iniciativa e sugeriram a linha de pesquisa a ser desenvolvida.

A empresa Mercoplás, na figura do Sr. Tagashi, que forneceu as matérias primas para preparação das composições estudadas.

Ao meu orientador professor Dr. Benjamim de Melo Carvalho e ao meu co-orientador professor Dr. Luís Antonio Pinheiro que me orientaram para que eu conseguisse realizar esta pesquisa.

Aos colegas dos laboratórios Dirceu e Rafael que me ajudaram na preparação das composições e injeção dos corpos de prova; Milton, Carlos e Barbara que auxiliaram na caracterização das composições preparadas.

Ao meu irmão Leandro que ajudou com as correções e, em especial a minha mãe Marly que cuidou do meu filho Victor Leandro e meu marido Armando que me deu apoio técnico para preparar essa dissertação.

RESUMO

Buscar novas formas de reciclagem e novos materiais a partir da mistura de materiais que já foram utilizados é importante para garantir a sustentabilidade e dar continuidade à cadeia dos produtos. O presente estudo foi realizado com o objetivo de encontrar alternativas para reciclar o papel proveniente das embalagens cartonadas longa vida, através da incorporação das fibras em uma matriz de polietileno reciclado. Para isso foram adicionados 5%, 10%, 15% e 20% de fibras de celulose na matriz polimérica através do processo de extrusão em equipamento de rosca simples e conformação de corpos de prova por injeção. Para verificar as características obtidas nas formulações preparadas as amostras foram submetidas a ensaios mecânicos de tração e flexão e caracterização morfológica através dos ensaios como microscopia eletrônica de varredura, infravermelho e caracterização térmica em DSC-Hot Stage. Através dos ensaios mecânicos de flexão e tração foi possível comprovar o aumento na rigidez e da tensão de escoamento do polímero com a adição de fibras de celulose. A degradação do PEBD utilizado oriundo de resíduo industrial não se mostrou significativa, a partir de análises de FTIR. Em termos de caracterização térmica, realizada através do ensaio de DSC na Hot Stage, foi possível verificar que a presença de fibras de celulose não interferiu na temperatura de fusão do material e também não apresentou efeito nucleante, não alterando a temperatura de cristalização da matriz de PEBD.

Palavras-chave: Embalagens longa vida pós-consumo, fibra de papel, compósito.

ABSTRACT

Search new recycling ways and new materials from the mixture of materials that have been used it is important to ensure the sustainability and continuity of the product chain. This study was conducted in order to find alternatives to recycle the paper from the long life carton packages, through the incorporation of fibers in a matrix of recycled polyethylene. For this research was added 5%, 10%, 15% and 20% of cellulose fibers in the polymer matrix by in single screw extrusion process and conformation of specimens by injection. To check the features obtained from the formulations prepared samples were subjected to tensile test and bending, morphological characterization by scanning electron microscopy, infrared and DSC tests as the Hot Stage. Through tensile and bending tests was possible to prove the increase in stiffness and the yield stress of the polymer with the addition of cellulose fibers. FTIR analysis showed that degradation of LDPE used in the research, coming from industrial waste, was not significant. In terms of thermal characterization, performed by testing DSC on Hot Stage, the presence of cellulose fibers neither affected the melting temperature of the material nor submitted nucleating effect, did not changing the temperature of crystallization of the matrix LDPE.

Keywords: Long life carton packages post-consume, paper fiber, composite.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução..... | 16 |
| 2 | Objetivo..... | 18 |
| 3 | Revisão de literatura..... | 19 |
| 3.1 | Embalagens cartonadas longa vida..... | 19 |
| 3.2 | Reciclagem das embalagens cartonadas longa vida..... | 21 |
| 3.3 | Aplicação do material reciclado das embalagens cartonadas longa vida..... | 25 |
| 3.4 | Compósitos..... | 36 |
| 3.4.1 | Tipos de materiais compósitos..... | 37 |
| 3.4.2 | Matriz dos materiais compósitos..... | 37 |
| 3.4.3 | Compósitos reforçados com fibras..... | 38 |
| 3.4.4 | Compósitos híbridos..... | 40 |
| 4 | Materiais e Métodos..... | 41 |
| 4.1 | Materiais..... | 41 |
| 4.1.1 | Materiais constituintes..... | 41 |
| 4.1.2 | Formulações dos compósitos..... | 41 |
| 4.2 | Preparação das formulações..... | 42 |
| 4.2.1 | Preparação da fibra de celulose..... | 42 |
| 4.2.2 | Preparação do polietileno..... | 44 |
| 4.2.3 | Mistura dos componentes..... | 44 |
| 4.2.4 | Processo de extrusão das composições..... | 45 |
| 4.2.5 | Conformação das amostras..... | 46 |
| 4.3 | Caracterização Mecânica..... | 46 |
| 4.3.1 | Ensaio de tração e flexão..... | 46 |
| 4.4 | Caracterização morfológica..... | 49 |
| 4.4.1 | DSC Hot Stage..... | 49 |
| 4.4.2 | Microscopia eletrônica de varredura (MEV)..... | 49 |
| 4.4.3 | Ensaio de Infravermelho - FTIR..... | 52 |
| 5 | Resultados e discussão..... | 54 |
| 5.1 | Ensaio mecânicos..... | 54 |
| 5.1.1 | Tração..... | 54 |
| 5.1.2 | Flexão..... | 58 |
| 5.2 | Ensaio morfológicos..... | 60 |
| 5.2.1 | DSC Hot Stage..... | 60 |
| 5.2.2 | Microscopia eletrônica de varredura (MEV)..... | 62 |
| 5.2.3 | Espectroscopia no Infravermelho..... | 72 |
| 6 | Conclusões..... | 76 |
| 7 | Sugestões para trabalhos futuros..... | 77 |
| 8 | Referências..... | 78 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Dr | Doutor |
| ELV | Embalagens longa vida |
| CH ₂ OH | Metano |
| OH | Hidroxila |
| O | Átomo de oxigênio |
| NaOH | Hidróxido de sódio |
| Na ₂ S | Sulfeto de sódio |
| O ₂ | Molécula de oxigênio |
| PE | Polietileno |
| °C | Graus Celsius |
| l/d | Litro por dia |
| kN | Quilo Newton |
| mm/min | Milímetro por minuto |
| DSC | Differential Scanning Calorimetry |
| MEV | Microscopia eletrônica de varredura |
| MPa | Mega Pascal |
| PE/Al | Matriz de polietileno e alumínio |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Estrutura de formação de uma embalagem cartonada longa vida. | 19 |
| Figura 3.2 - Diagrama de blocos do processo de reciclagem de embalagens cartonadas multicamadas. | 22 |
| Figura 3.3 - Hidrapulper vendido comercialmente. | 23 |
| Figura 3.4 - Rotores do Hidrapulper. | 24 |
| Figura 3.5 - Desagregação das embalagens cartonadas multicamadas. | 24 |
| Figura 3.6 - Mantas de papel reciclado provenientes da reciclagem das embalagens cartonadas longa vida. | 25 |
| Figura 3.7 - Cadernos produzidos com papel reciclado e capa de polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida. | 26 |
| Figura 3.8 - Telhas produzidas com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida. | 26 |
| Figura 3.9 - Móveis produzidos com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida. | 27 |
| Figura 3.10 - Vassouras produzidas com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida. | 27 |
| Figura 3.11 - Coletores produzidos com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida. | 28 |
| Figura 3.12 - Piso produzido com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida (TETRAPAK, 2011a). | 28 |
| Figura 3.13 - Polpa de papel moldado. | 30 |
| Figura 3.14 - Acessórios. | 30 |
| Figura 3.15 - Bag in Box. | 31 |
| Figura 3.16 - Brinquedos, a fabricação de brinquedos, nos quais a criança consegue pintar e escrever, personalizando-os. | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.17 - Caixa com Label, este tipo de embalagem permite uma ótima qualidade de impressão..... | 32 |
| Figura 3.18 - Caixa corte e vinco. | 33 |
| Figura 3.19 - Caixa em papelão micro ondulado..... | 34 |
| Figura 3.20 - Caixa tipo normal..... | 34 |
| Figura 3.21 - Chapa de papelão ondulado, em diversos formatos e gramaturas, utilizadas principalmente por cartonagens na conversão de embalagens. | 35 |
| Figura 3.22 - Heave Duty. | 35 |
| Figura 4.1 – Fibra de papel durante o processo de secagem. | 43 |
| Figura 4.2 - Fibra de papel durante o processo de preparação. | 43 |
| Figura 4.3 - Fibra após ser peneirada e seca..... | 44 |
| Figura 4.4 - Composição preparada para o processo de extrusão. | 45 |
| Figura 4.5 – Ilustração do processo de extrusão das composições..... | 46 |
| Figura 4.6 - Corpos-de-prova conformados para ensaio de tração. Composição 0% de fibra, 5%, 10%, 15% e 20% de fibra respectivamente..... | 47 |
| Figura 4.7 - Corpos-de-prova conformados para ensaio de flexão. Composição 0% de fibra, 5%, 10%, 15% e 20% de fibra, respectivamente..... | 48 |
| Figura 4.8 – a) Amostra sendo preparada em cadinho de alumínio; b) Hot Stage DSC600 da Linkam acoplada a microscópio ótico. | 49 |
| Figura 4.9 – Amostra com 20% de fibra de papel preparada para ensaio MEV. | 50 |
| Figura 4.10 – Amostra com 15% de fibra de papel preparada para ensaio MEV. | 50 |
| Figura 4.11 – Amostra com 10% de fibra de papel preparada para ensaio MEV. | 51 |
| Figura 4.12 – Amostra com 5% de fibra de papel preparada para ensaio MEV. | 51 |
| Figura 4.13 – Amostra sem fibra de papel preparada para ensaio MEV..... | 51 |
| Figura 4.14 – Filme de polietileno virgem. | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.15 – Filme de polietileno reciclado..... | 53 |
| Figura 5.1 - Gráficos representando curvas típicas do ensaio de tração realizado nas composições sem fibra e com adição de porcentagens variando de 5% a 20% de fibra de papel. | 54 |
| Figura 5.2– Tensão máxima no ensaio de tração para as composições de polietileno puro e seus compósitos com fibra de papel. | 55 |
| Figura 5.3 – Módulo elástico para as composições preparadas e ensaiadas por tração. | 56 |
| Figura 5.4 – Tensão de escoamento das composições durante ensaio de tração..... | 57 |
| Figura 5.5 – Módulo de flexão das composições de PEBD/fibra de papel. | 59 |
| Figura 5.6 – Tensão máxima suportada pelas composições durante ensaio de flexão..... | 59 |
| Figura 5.7 – Termograma em DSC Hot Stage das composições de PEBD reciclado puro, 5% a 20% de fibra de papel durante aquecimento até 180°C numa taxa de aquecimento de 10°C/min..... | 60 |
| Figura 5.8 – Termograma em DSC Hot Stage das composições de PEBD puro, 5% a 20% de fibra de papel durante resfriamento até 30°C com taxa de 10°C/min..... | 61 |
| Figura 5.9 - Microscopia eletrônica de varredura de amostra de fibra de papel após processo de desaglomeração e secagem em estufa..... | 63 |
| Figura 5.10 – Microscopia eletrônica de varredura de amostra de fibra de papel após processo de desaglomeração e secagem em estufa..... | 63 |
| Figura 5.11 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno puro..... | 64 |
| Figura 5.12 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno puro..... | 65 |
| Figura 5.13 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 5% fibra de papel. | 65 |
| Figura 5.14 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 5% fibra de papel. | 66 |
| Figura 5.15 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 5% fibra de papel. | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.16 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 10% fibra de papel. | 67 |
| Figura 5.17 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 10% fibra de papel. | 67 |
| Figura 5.18 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 10% fibra de papel. | 68 |
| Figura 5.19 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 15% fibra de papel. | 68 |
| Figura 5.20 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 15% fibra de papel. | 69 |
| Figura 5.21 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 15% fibra de papel. | 69 |
| Figura 5.22 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 20% fibra de papel | 70 |
| Figura 5.23 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 20% fibra de papel. | 70 |
| Figura 5.24 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 20% fibra de papel. | 71 |
| Figura 5.25 – Espectro de infravermelho para polietileno virgem e para o polietileno reciclado feito por refletância. | 72 |
| Figura 5.26 – Detalhe do espectro de infravermelho para polietileno virgem e para o polietileno reciclado feito por reflectância. | 73 |
| Figura 5.27 – Espectro de infravermelho para polietileno virgem e para polietileno reciclado feito por transmitância. | 74 |
| Figura 5.28 – Detalhe do espectro de infravermelho para polietileno virgem e para o polietileno reciclado feito por transmitância. | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Composições preparadas com % em massa | 42 |
| Tabela 5.1 Variação de temperaturas de fusão do PEBD nas composições estudadas durante aquecimento até 180°C com taxa de aquecimento de 10°C/min. | 61 |
| Tabela 5.2 – Variação de temperaturas de cristalização das composições estudadas durante resfriamento até 30 °C com taxa de resfriamento de 10°C/min..... | 62 |

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e o conseqüente aumento no consumo de bens, aumenta cada vez mais a geração de resíduos. Dentre os resíduos gerados na atualidade, muitos ainda acabam por ser destinados de forma inadequada em aterros.

Em contra partida, vêm surgindo iniciativas e legislações que promovem trabalhos de coleta seletiva e transformam resíduos que antes eram enterrados de qualquer maneira em matérias primas que retornam para as indústrias e são transformados novamente em produtos, de diversas maneiras e com diversos usos, renovando os ciclos de vida.

Desta forma, podem ser classificadas também, as embalagens cartonadas longa vida. As mesmas são produzidas a partir de três principais matérias primas: papel, que compõem cerca de 75% dos componentes, polietileno e alumínio que completam a formação deste produto inovador.

Após serem utilizadas em seus principais fins, proteção e segurança alimentar, as embalagens cartonadas longa vida são passíveis de transformações e podem ser novamente utilizadas na forma de diferentes produtos.

O processo de reciclagem das embalagens cartonadas longa vida se inicia com a retirada das fibras de papel que estão presentes na composição das camadas formadoras do produto. Geralmente, estas fibras são utilizadas para a fabricação de papel reciclado na forma de caixas de papelão, papel ondulado ou outros tipos de papéis desta natureza.

O que resta deste processo é uma mistura de polietileno e alumínio. Esta mistura vem sendo tratada de duas principais formas: juntos onde são extrudados e posteriormente injetados produzindo produtos poliméricos como base de vassouras, banquetas, cadeiras, paletes, cabides, coletores para resíduos, parte interna de geladeiras; ou simplesmente prensados termicamente na forma de chapas ou telhas. Podem também, ser separados por meio de um processo térmico em atmosfera controlada, onde o alumínio retorna com 99% de pureza na forma de alumínio em pó (podendo ser utilizado industrialmente em diversos ramos, inclusive na indústria de tintas metalizadas) e o polietileno se degrada e após ser condensado retorna na

forma de cera de parafina podendo ser usada na indústria moveleira ou na indústria de velas.

Dando continuidade a estudos já realizados e dos quais surgiram formas para a reciclagem das embalagens cartonadas longa vida, este trabalho se destina a pesquisar novas composições onde a fibra de papel reciclado das embalagens cartonadas longa vida possam ser utilizadas como reforço em matrizes poliméricas de forma a agregar valor a este resíduo e gerando novas opções para as indústrias que trabalham com estes tipos de matérias primas.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo geral avaliar a influência da incorporação de fibras de papel proveniente de embalagens cartonadas longa vida em matriz de PEBD reciclado. Como objetivos específicos tem-se:

a) Preparar as formulações de PEBD/Fibra de Papel sem condições especiais de processamento em termos de equipamentos e aditivos visando reproduzir condições típicas de empresas recicladoras.

b) Avaliar a influência das fibras de papel sobre o comportamento mecânico e morfológico da matriz polimérica de PEBD.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 EMBALAGENS CARTONADAS LONGA VIDA

As embalagens longa vida surgiram na década de 50 quando o sueco, Dr. Ruben Rausing, previu a necessidade de embalagens que acondicionassem os alimentos preservando os mesmos de forma segura por mais tempo (TETRAPAK, 2009a).

Uma embalagem cartonada longa vida é formada por três materiais básicos, papel, polietileno e alumínio. Na Figura 3.1 pode ser vista a estrutura da embalagem cartonada longa vida, sendo formada por seis camadas: a primeira, terceira, quinta e sexta camadas são de polietileno, que protegem contra a umidade externa, oferecendo aderência entre as camadas e impedindo o contato do alumínio com o alimento. O papel da segunda camada, papel, garante a estrutura da embalagem. E, a quarta camada, alumínio, é responsável pela proteção contra a luz, perda de aroma e contaminações (TETRAPAK, 2009b).

Figura 3.1 - Estrutura de formação de uma embalagem cartonada longa vida.



Fonte: TETRA PAK. **Embalagens cartonadas**. Disponível em: <<http://www.tetrapak.com.br/negocios/embalagens/familias.asp>>. Acesso em: 19 de abril de 2009b.

A produção de embalagens cartonadas longa vida é um processo que se divide em três etapas principais: impressão, laminação e corte.

No processo de impressão, camadas de tinta estampam imagens e frases no papel que dará estrutura para formação da embalagem. Depois de impresso, o papel passa pelo processo de laminação onde são incorporadas as camadas de polietileno e alumínio. A etapa seguinte é onde os rolos são separados (cortados) em bobinas que são preparadas para ser encaminhada para o cliente.

Segundo Neves (2000), um papel cartão para a confecção de embalagens precisa de características referentes a propriedades ópticas, onde o aspecto visual é de grande importância; propriedades mecânicas, visando possuir resistência mecânica adequada para o fim proposto; e, propriedades de desempenho gráfico. As propriedades ópticas e a textura do cartão são alvo de atenção quando se fala da reciclagem destes materiais, porque estas estão ligadas a qualidade de impressão. A cor alva do papel é algo relacionado principalmente ao costume e ao gosto dos consumidores e, torna-se um ponto pouco comum quando se está trabalhando com papel reciclado; mas, isso é minimizado quando se usa o cartão reciclado para aplicações onde a qualidade de impressão está ligada ao revestimento do papel, sendo medida pela aspereza do material.

Normalmente, quando são analisadas propriedades mecânicas de papel para embalagens cartonadas longas vida verifica-se rigidez, resistência ao alongamento, à tração, ao arrebentamento, ao rasgo, à dobra e à delaminação, e algumas características físicas como volume aparente, a espessura e a permeância ao ar (NEVES, 2000).

A propriedade de rigidez é responsável por conferir a resistência à compressão e abaulamento das embalagens; quando a rigidez do papel está adequada para a aplicação facilita as etapas do processo de produção e dobramento, além de proporcionar proteção para produtos sem formato definido, como os líquidos (MOURAD, 2004).

Dentre os fatores que podem afetar a rigidez do papel estão a espessura, o módulo de elasticidade, a umidade, densidade, gramatura e orientação das fibras. Geralmente é determinada por equipamentos que determinam a deformação por um momento fletor (RAZZOLINI, 1994).

A propriedade de resistência ao alongamento refere-se a medição de distensão do papel quando estendido até sua ruptura (NEVES, 2009).

A resistência à tração está relacionada com a carga aplicada no material por unidade de área no momento de ruptura (MULARINI, 2009).

3.2 RECICLAGEM DAS EMBALAGENS CARTONADAS LONGA VIDA

A reciclagem tem sido vista como uma forma usual de negócio proporcionando boa lucratividade para os investidores e trazendo vasto benefício para a sociedade como um todo e para o meio ambiente (SPINACÉ e PAOLI, 2005).

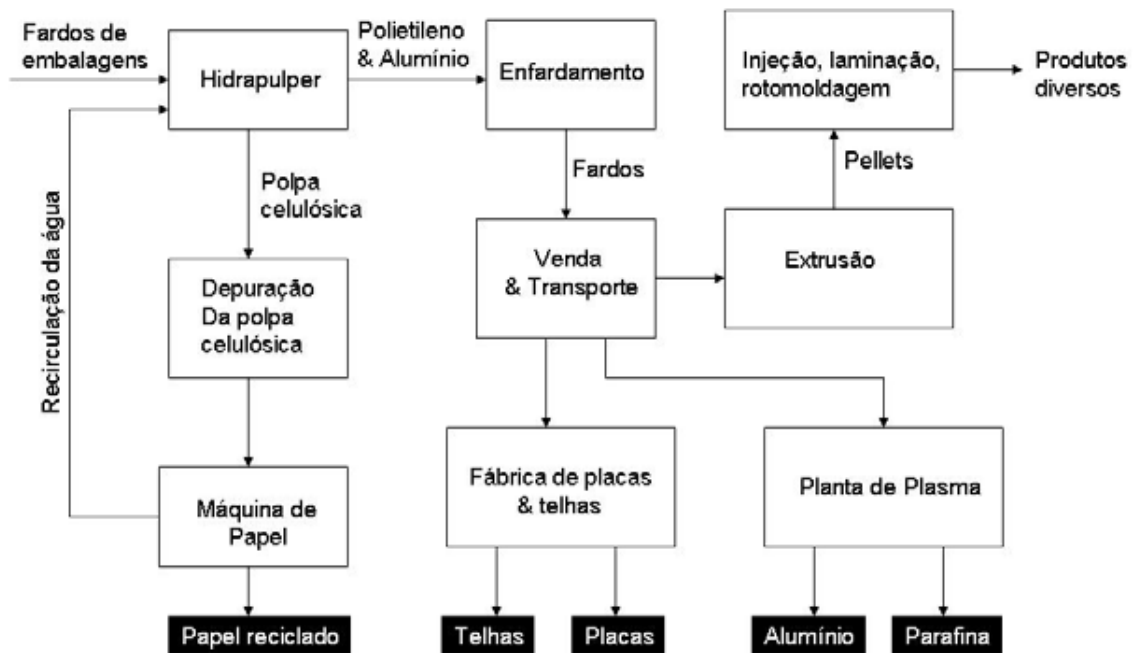
É interessante que materiais reciclados sejam utilizados para a produção de produtos com uma vida útil elevada para que os benefícios desta transformação sejam usufruídos por mais tempo (SPINACÉ e PAOLI, 2005; SOARES et al., 2002).

As dificuldades no ramo de reciclagem de materiais são a falta de comprometimento para demanda contínua do resíduo utilizado como matéria prima e em alguns casos a contaminação dos resíduos (SANTOS et al., 2004).

As embalagens cartonadas longa vida pós-consumo se enquadram como materiais que podem ser utilizados como matéria prima para indústrias de reciclagem e podem ser tratadas através da reciclagem secundária.

O processo de reciclagem das embalagens cartonadas longa vida se inicia de forma semelhante ao processo para reciclagem do papel; o que diferencia estes processos é a presença das camadas componentes de polietileno e alumínio que formam a embalagem longa vida. Por meio da Figura 3.2, é possível entender as etapas do processo de reciclagem das embalagens longa vida.

Figura 3.2 - Diagrama de blocos do processo de reciclagem de embalagens cartonadas multicamadas.



Fonte: NEVES, F. L. **Eletrodissolução de alumínio em polpa celulósica proveniente da reciclagem de embalagens cartonadas multicamadas**. 2009, 109f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2009.

Os fardos de embalagem cartonada longa vida são dispostos no hidrapulper com certa quantidade de água e submetido a agitação para separação das fibras de papel. A polpa de celulose é encaminhada para depuração e posteriormente encaminhada à máquina de papel para formação do papel reciclado. Como resíduo do processo obtém-se polietileno e alumínio que são enfardados e encaminhados para reciclagem através de outros processos de transformação. Um dos processos de transformação do polietileno e do alumínio é a fabricação de placas e telhas através de prensagem térmica. Um segundo processo considerado pode ser a extrusão do material que, em pellets, poderá ser usado para conformação de diversos produtos plásticos. Como terceiro processo o polietileno e alumínio são submetidos ao processo de transformação térmica, sendo separados e resultando em alumínio com alto grau de pureza e o polímero se transformando em cera de parafina.

Para entender melhor como funciona o processo de desagregação é necessário que se conheça um pouco mais sobre o equipamento utilizado para

este fim. A Figura 3.3 mostra um hidrapulper vendido comercialmente, o qual é capaz de promover a separação de todas as fibras de papel durante a reciclagem. O princípio de funcionamento é semelhante a de um liquidificador e o produto obtido é uma polpa de papel homogênea (HAHN, CAVALHEIRO, SANTANA, 2010).

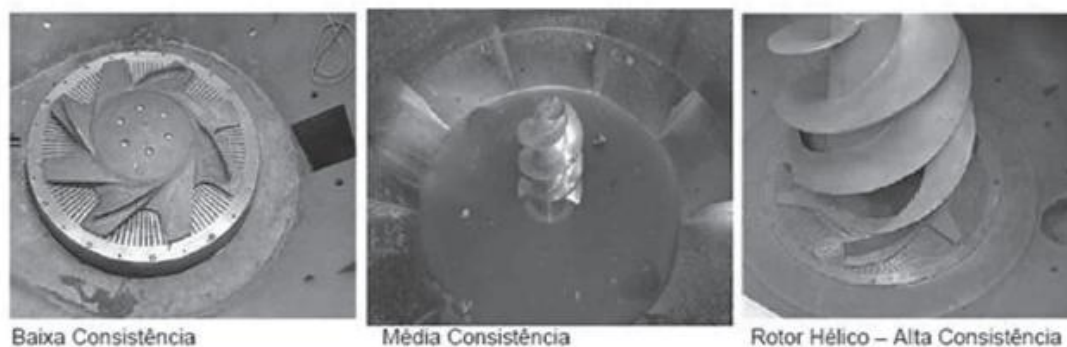
Figura 3.3 - Hidrapulper vendido comercialmente.



Fonte: HAHN A. F.; CAVALHEIRO, A. Z.; SANTANA, F. E. Projeto Conceitual de um Desagregador para Reciclagem de Papel. **Caderno de Publicações Acadêmicas**. Araranguá: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IF-SC, 2010.

Os desagregadores podem variar de acordo com o que se está processando, sendo de baixa, média ou alta consistência e, ter a qualidade da polpa modificada através do tipo de rotor que o compõe. Na Figura 3.4 podem ser vistos os diferentes tipos de rotores que fazem parte do desagregador (HAHN, CAVALHEIRO, SANTANA, 2010).

Figura 3.4 - Rotores do Hidrapulper.



Fonte: HAHN A. F.; CAVALHEIRO, A. Z.; SANTANA, F. E. Projeto Conceitual de um Desagregador para Reciclagem de Papel. **Caderno de Publicações Acadêmicas**. Araranguá: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IF-SC, 2010.

A Figura 3.5 mostra as fibras de papel se desagregando das camadas de embalagem longa vida através da agitação mecânica no Hidrapulper.

Figura 3.5 - Desagregação das embalagens cartonadas multicamadas.



Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas**: fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Após a separação do papel no processo do Hidrapuper, obtem-se as fibras de celulose e um resíduo composto por polietileno e alumínio. Como as fibras obtidas são provenientes do primeiro ciclo de reciclagem, possuem benefícios e boas propriedades mecânicas ao papel (VON ZUBEN,2005; NEVES, 2004; NEVES; VON ZUBEN,2003; CERQUEIRA,2002).

3.3 APLICAÇÃO DO MATERIAL RECICLADO DAS EMBALAGENS CARTONADAS LONGA VIDA

A partir da reciclagem das embalagens cartonadas longa vida é possível obter vasta gama de produtos, como, caixas de papel reciclado, cadernos, folhetos, telhas e placas que podem ser utilizadas na fabricação de móveis, produtos injetados e rotomoldados como verificado nas Figuras 3.6 a 3.12.

Figura 3.6 - Mantas de papel reciclado provenientes da reciclagem das embalagens cartonadas longa vida.



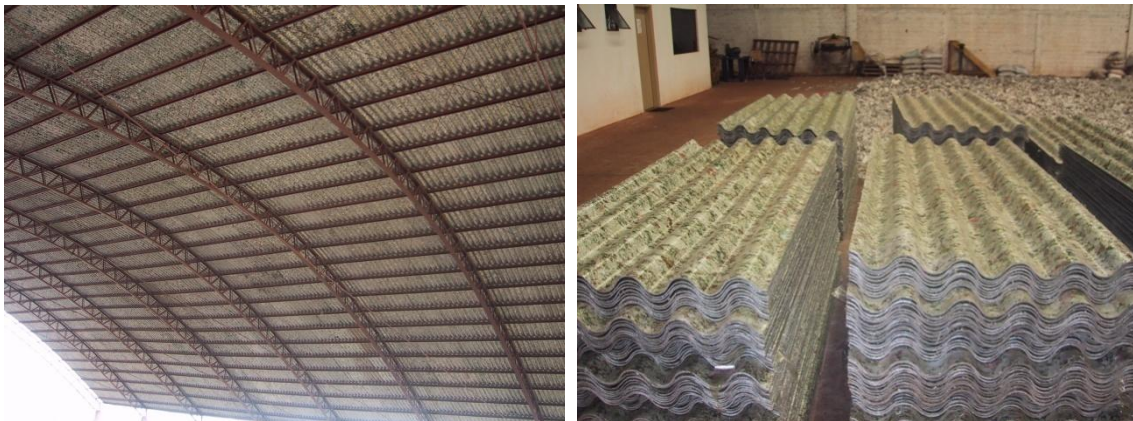
Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas:** fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Figura 3.7 - Cadernos produzidos com papel reciclado e capa de polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida.



Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas:** fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Figura 3.8 - Telhas produzidas com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida.



Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas:** fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Figura 3.9 - Móveis produzidos com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida.



Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas**: fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Figura 3.10 - Vassouras produzidas com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida.



Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas**: fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Figura 3.11 - Coletores produzidos com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida.



Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas:** fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Figura 3.12 - Piso produzido com polietileno e alumínio provenientes das embalagens cartonadas longa vida (TETRAPAK, 2011a).



Fonte: TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas:** fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.

Historicamente, o uso de fibras de celulose para produção de papel teve seu início com o uso do papiro, que na seqüência foi muito utilizado pelos chineses, vindo a difundir-se por todo o mundo. Por volta de 1719, Réaumur veio a sugerir a fabricação de celulose a partir da madeira (LIMA et al., 1988).

Com a difusão do uso do papel, podendo ser utilizado para impressão e como embalagens, entre outros produtos, crescem as exigências quanto a qualidade, custo e facilidades no processo de fabricação, sendo assim viabilizado o processo de reciclagem das fibras. Além da viabilidade econômica, as questões ambientais também são fatores que favorecem e fazem crescer a busca por alternativas de reciclagem que proporcionem papel com qualidade compatível com o produto fabricado a partir de matérias primas virgem. Evita-se assim, o uso de madeira para obtenção de celulose e o descarte desnecessário dos resíduos de papel em aterros sanitários (NEVES, 2009).

O papel reciclado possui uma vasta variedade de aplicações, entre as quais pode-se destacar: caixas de carga pesada (*heavy duty*), *displays*, caixas impressas de diferentes formatos, brinquedos e chapas (KLABIN, 2011).

De acordo com dados fornecidos pela Associação Brasileira de Papelão Ondulado (ABPO), 40% da produção nacional de papelão ondulado é encaminhada para o setor alimentício, 25% para a siderurgia e a metalurgia, 15% para os convertedores de chapas em caixas, 11% para cosméticos, produtos de higiene e limpeza e produtos químicos e 7% para a fruticultura e a floricultura, um segmento que cresceu quase 30% no período de 2005 a 2010. As Figuras 3.13 a 3.22 mostram exemplos de produtos tradicionais fabricados a partir do papel reciclado (KLABIN, 2011).

Figura 3.13 - Polpa de papel moldado.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Figura 3.14 - Acessórios.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Os acessórios são criados de acordo com as mais diferentes necessidades e tipos de embalagens, podendo servir como separadores e suporte para aumento de rigidez, entre outros fins (KLABIN, 2011).

Figura 3.15 - Bag in Box.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Na Figura 3.15 está demonstrado um sistema em papelão ondulado com uma bolsa plástica interna. É resistente a impactos, ao manuseio, a baixas temperaturas e à umidade (KLABIN, 2011).

Figura 3.16 - Brinquedos, a fabricação de brinquedos, nos quais a criança consegue pintar e escrever, personalizando-os.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Figura 3.17 - Caixa com Label, este tipo de embalagem permite uma ótima qualidade de impressão.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Figura 3.18 - Caixa corte e vinco.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Na Figura 3.18 está representada a caixa com corte e vinco, embalagem que se ajusta a qualquer tipo de produto, devido ao seu processo de fabricação, que permite a criação de cortes e vincos específicos às necessidades do produto embalado (KLABIN, 2011).

Figura 3.19 - Caixa em papelão micro ondulado.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

As caixas em papelão micro-ondulado são um tipo de embalagem ocupa menos espaço, o que gera ganhos no frete e na armazenagem, além de permitir a produção de embalagens com display de pequeno porte (KLABIN, 2011).

Figura 3.20 - Caixa tipo normal.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Este tipo de embalagem, representado na Figura 3.20, por sua versatilidade, permite que seja utilizada pela maior parte dos segmentos, como alimentício, bebidas, higiene e limpeza, papelaria e outros. Impressas pelo sistema flexográfico, permitem excelente resultado com qualidade e economia (KLABIN, 2011).

Figura 3.21 - Chapa de papelão ondulado, em diversos formatos e gramaturas, utilizadas principalmente por cartonagens na conversão de embalagens.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

Figura 3.22 - Heave Duty.



Fonte: KLABIN. **Produtos** Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>> Acesso em 23 de agosto de 2011.

As embalagens Heave Duty são uma linha que apresenta soluções práticas e seguras de armazenagem, enchimento, esvaziamento e fixação, garantindo a proteção necessária para o produto embalado. Em alguns casos, as embalagens podem ser usadas mais de uma vez, o que representa economia na cadeia logística do cliente. É 100% reciclável, resistente a impactos e ao manuseio, podendo receber tratamento para suportar baixas temperaturas e altos índices de umidade (KLABIN, 2011).

3.4 COMPÓSITOS

Um material compósito é formado por dois ou mais constituintes, com características químicas e forma diferentes que se conservam distintos após seu processamento e permanecem separados por uma interface definida (FERRANTE, 2002).

Segundo Mendonça (2005 citado por FELIPE, 2008), um compósito é formado pela união de dois ou mais materiais de naturezas diferentes, obtendo um material de desempenho superior àquele de seus componentes tomados separadamente. O material que resulta desta conformação é um arranjo de fibras, contínuas ou não, de um material resistente que são dispostos em uma matriz de resistência mecânica inferior as fibras. Este conceito garante ao profissional criar um novo material, com características desejáveis e podendo minimizar as indesejáveis por meio da combinação dos componentes.

Os compósitos poliméricos estruturais possuem aplicações em vários setores da indústria moderna, com um crescimento de cerca de 5% ao ano (REZENDE, BOTELHO; 2000).

Apresentam como característica baixa densidade, fácil conformação e alta resistividade elétrica. São compostos pela combinação de materiais para obter características desejadas. A interface entre o reforço e a matriz, é de grande importância por promover o contato entre os materiais que compõem o compósito, e disto dependem as propriedades que o material obterá (HULL, 1988 citado por OLIVEIRA, 2007).

3.4.1 Tipos de materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a forma como seus constituintes são dispostos, podendo ser fibrosos, laminados e/ou particulados.

Os compósitos fibrosos são aqueles em que as fibras se apresentam no material de forma contínua ou descontínua em uma matriz. Os laminados aparecem em camadas alternadas de materiais diferentes como metais, vidros, tecidos ou papéis impregnados com polímeros e, os particulados são aqueles em que os materiais de reforço são equiaxiais podendo apresentar forma esférica (FERRANTE, 2002).

Segundo Barros (2004), a utilização de polímeros reforçados com fibras na composição de sua estrutura pode evitar as técnicas de reforço tradicionais; possuem um peso específico relativamente baixo e aumentam a resistência mecânica além de não sofrerem corrosão.

Existem alguns aspectos que precisam ser observados porque influenciam negativamente na estrutura e nas propriedades dos compósitos, entre eles, a quebra da fibra, variações de umidade e temperatura, volume ideal de fibras, projeto do produto que utilizará o material, resistência à tração e à corrosão e resistência ao desgaste (HULL, 1988 citado por OLIVEIRA, 2007).

3.4.2 Matriz dos materiais compósitos

A matriz de um material compósito influencia nos processos de conformação e custo do produto final (SOBRINHO, 2005). Dentre as resinas poliméricas mais utilizadas, estão os termofixos, principalmente pelo fato de serem mais baratos. Os epóxis são mais caros, sendo utilizados tanto em formulações comerciais quanto em aplicações aeroespaciais. Possuem propriedades mecânicas melhores e melhor resistência à umidade do que as resinas anteriores. Para aplicações onde a temperatura é mais elevada, normalmente são utilizadas as poli-imidas (CALLISTER JR, 2002).

Vários tipos de polímeros termoplásticos podem ser utilizados como matriz contínua ou descontínua em materiais compósitos, desde que se observe a

temperatura de fusão das mesmas, que deve ser inferior às temperaturas de degradação do material de reforço (MACIEL, 2001).

3.4.3 Compósitos reforçados com fibras

Os materiais compósitos reforçados com fibras têm sido muito utilizados em diversas áreas como indústria automobilística e aeroespacial, principalmente devido às características que estes materiais apresentam como aumento de resistência mecânica, rigidez elevada, entre outras (GOMES et al, 2003).

Segundo Ferrante (2002) o desempenho dos compósitos depende basicamente do arranjo do comprimento das fibras. Callister Jr (2002) complementa que a orientação das fibras pode ocorrer em dois extremos possíveis: (1) um alinhamento paralelo ao eixo longitudinal das fibras em uma única direção e (2) alinhamento totalmente aleatório.

A forma em que as fibras se encontram dispersas impactam no desempenho dos materiais compósitos. A compatibilidade entre fibras e matriz influencia no resultado; ou seja, um fibra polar e higroscópica usada como reforço em uma matriz apolar e hidrofóbica atrapalha a dispersão fazendo com que as fibras fiquem agrupadas e diminuem as propriedades (ROWELL et al, 1997, citado por OLIVEIRA, 2007).

Os reforços geralmente são utilizados para melhorar ou eliminar danos na estrutura e seus elementos, na necessidade de obter uma conformação específica, na sobrecarga de utilização ou em alguma necessidade específica (CRUZ, 2008).

As fibras de vidro são um exemplo comum de reforço em compósitos de matriz polimérica. Elas conferem resistência mecânica ao material polimérico que possui a capacidade de ser flexível (PADILHA, 2000).

Outro exemplo é o uso de fibras de carbono, boro e quartzo em matrizes poliméricas. Estes materiais permitem grande flexibilidade aos projetos e são largamente utilizados em compósitos estruturais para a indústria aeroespacial (REZENDE, BOTELHO; 2000).

Em Lopes e Felisberti (2006), é descrita a influência da presença do alumínio na matriz PE/Al na cristalização do compósito, isto porque o alumínio funciona como nucleante, ocorrendo neste caso uma nucleação heterogênea.

Geralmente um compósito onde o reforço é uma fibra natural é chamado de eco-compósito e são reforços conhecidos como biodegradáveis (GACEVA et al, 2007; TORRES, 2009).

As fibras naturais incorporadas a matrizes poliméricas biodegradáveis (usualmente compostas por adição de amido) colaboram para elevar as propriedades mecânicas (GACEVA et al, 2007).

Segundo Padilha (2000), a resistência mecânica das fibras aumenta com a diminuição do diâmetro das mesmas, isto devido ao fato de que a redução na secção da fibra causa diminuição nas dimensões e no número de defeitos superficiais.

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos para buscar aplicações mais nobres para as fibras vegetais, que geralmente são utilizadas para a obtenção de energia. Um exemplo disso são os trabalhos de Joseph, Medeiros, Carvalho (1999), Luz, Gonçalves, Arco Jr (2006) e Eires, Jalali, Camões (2007).

Diversos tipos de fibra vêm sendo utilizados como reforço para melhorar as propriedades das matrizes poliméricas. Segundo Tita, Paiva e Frollini (2002), a fibra de cana de açúcar apresenta a possibilidade de ser utilizada junto à matriz polimérica, havendo a necessidade dos tratamentos para compatibilizar este reforço na matriz pela presença de lignina no bagaço da cana de açúcar.

As fibras de celulose apresentam boas características para serem incorporadas como reforço em materiais compósitos. São provenientes de fontes renováveis, apresentam baixo custo e são estáveis química e fisicamente em ampla faixa de temperatura (KAPLAN, 1998; BRANDT, SCHUSTER, NUNES, 2006; GINDL, KCKES, 2005 citados por LAPA, 2007).

Fibras têxteis naturais, como o algodão, são fibras que possuem estrutura unicelular diferenciada a partir das células epidérmicas provenientes da semente do algodoeiro. Possuem como características relacionadas ao seu comprimento, sua espessura fina, maturação, resistência, impurezas e outras mais (VIEIRA, 2006).

A casca de arroz vem sendo utilizada cada vez mais como substituto ao aglomerado de madeira, principalmente por apresentar resistência a cupins, elevada resistência à umidade e ao fogo e durabilidade. Além disso, é um resíduo com custo menor que a madeira. Suas características mecânicas também podem ser destacadas demonstrando elasticidade, estabilidade dimensional, resistência à abrasão, dureza em sua superfície, etc.(PAULESKI, 2005).

Outras fibras como o sisal, a casca de coco, juta e outras fibras vegetais, estão sendo utilizadas como reforço para peças utilizadas na indústria automobilística. Como resultado de pesquisas com estes reforços, percebe-se que para que haja compatibilidade entre os materiais e a matriz é necessário que se realize tratamento nas fibras ou no polímero para que a interação matriz-reforço proporcione melhoria nas propriedades do compósito (TITA, 2002; PAULESKI, 2005; SILVA, 2006; FAVARO et al, 2006).

Segundo Cerqueira (2006), o aumento na quantidade de fibras na matriz de PE/Al dificulta o processo de extrusão, além disso parte das fibras sofre degradação térmica.

3.4.4 Compósitos híbridos

Estes materiais se caracterizam por possuir a combinação de reforços de natureza diferente em sua estrutura, ou seja, possuem estrutura formada por fibras vegetais e/ou sintéticas e partículas combinadas de forma a compor o material (BARROS, 2004).

A mistura de fibras naturais, como fibra de coco, celulose, sisal e casca de arroz e fibras sintéticas, como a fibra de vidro, em uma matriz promovem a melhoria nas propriedades mecânicas do material, podendo ser influenciado pela forma como o compósito é conformado (JOHN e THOMAS, 2008 – citado por SILVA, 2010).

A natureza da matriz é um dos fatores que influencia as propriedades dos compósitos híbridos; além disso, as características do reforço, o comprimento, a composição, o grau de entrelaçamento das fibras, também podem contribuir para a melhoria nas propriedades do material (MITRA e HOLMES, 2003 – citado por SILVA, 2010).

A conformação deste tipo de compósito é, geralmente, mais complexa e, por esta razão, o custo do processo é mais elevado. Um dos mais utilizados é o compósito de fibra de carbono e fibra de vidro; ele é forte e tenaz, sendo resistente ao impacto. As falhas neste tipo de material não são catastróficas, sendo que as fibras de carbono falham primeiro e somente depois a carga é transferida para as fibras de vidro (RIBEIRO et al, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Materiais constituintes

O presente estudo utilizou dois materiais diferentes para preparar os compósitos. Um deles, a fibra de papel, é proveniente do processo de separação dos materiais das embalagens cartonadas longa vida pós consumo através do processo do Hidrapulper. A fibra de papel foi recebida em forma de placas com cerca de 5 mm de espessura da empresa Mercoplas em Valinhos/SP.

O segundo material utilizado como matriz nas composições foi o polietileno de baixa densidade. Este material também foi fornecido pela empresa Mercoplas e tem como origem o polietileno que foi refogado no processo de laminação durante a fabricação das embalagens cartonadas longa vida, tendo sido reciclado e granulado na recicladora.

4.1.2 Formulações dos compósitos

Através dos dados expostos na Tabela 4.1, podem ser observadas as composições preparadas para o presente estudo. As formulações foram elaboradas de forma que fosse possível verificar a influência da fibra de celulose na matriz de polietileno em termos das propriedades mecânicas, características térmicas e morfológicas dos compósitos.

Tabela 4.1 - Composições preparadas com % em massa

| Composição | Fibra de Celulose | PE Reciclado |
|-------------------|--------------------------|---------------------|
| 1 | | 100% |
| 2 | 5% | 95% |
| 3 | 10% | 90% |
| 4 | 15% | 85% |
| 5 | 20% | 80% |

Fonte: a autora

4.2 PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

Alguns trabalhos foram usados como base e apoio para realização deste estudo, como Cerqueira(2006), Lopes e Felisberti (2006), entre outros. Mas em nenhum deles os autores mostram de forma clara o procedimento para preparação das fibras de forma que o processo fosse facilmente reproduzido.

Cerqueira (2006) menciona ainda a adição de Fusabond da Dupont na matriz polimérica no intuito de melhorar sua homogeneização. Mas isso acabou por impedir composições com altas quantidades de fibra de celulose.

No presente estudo a intenção foi realizar uma preparação simples que possa ser reproduzida facilmente no ambiente de uma indústria de reciclagem.

4.2.1 Preparação da fibra de celulose

A manta de celulose foi colocada em imersão em água a fim de soltar as fibras, formando uma polpa de papel. A polpa de papel foi agitada por cerca de 10 minutos e, posteriormente, filtrada em pano de algodão para retirar o excesso de água. As fibras, nesta altura, ainda possuem grande quantidade de água, sendo necessário que o material permanecesse por 1 hora em estufa a temperatura de 105°C.

Após o tempo de secagem, a fibra foi manipulada para evitar a formação de aglomerados grandes, novamente deixada para repousar na estufa (mais 1 hora). A Figura 4.1 mostra fibra de papel durante este processo.

Figura 4.1 – Fibra de papel durante o processo de secagem.



Fonte: a autora

O passo seguinte foi manipular a fibra e passá-la em peneira de 10 mesh (Figura 4.2). Para finalizar a retirada de umidade, o material foi colocado novamente em estufa permanecendo por 12 horas (Figura 4.3).

Figura 4.2 - Fibra de papel durante o processo de preparação.



Fonte: a autora

Figura 4.3 - Fibra após ser peneirada e seca.



Fonte: a autora

4.2.2 Preparação do polietileno

O polietileno não precisou de preparação previa, ele somente foi pesado para compor as amostras estudadas e mantido em estufa a 105°C por 1 hora para diminuir a umidade e facilitar o processo de extrusão.

4.2.3 Mistura dos componentes

A fibra de celulose e o polietileno foram pesados conforme as quantidades previstas em cada uma das composições e misturados manualmente (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Composição preparada para o processo de extrusão.



Fonte: a autora

4.2.4 Processo de extrusão das composições

O equipamento utilizado para preparo das formulações foi uma extrusora CIOLA modelo ME 30 com razão l/d igual a 24. O processo de extrusão foi realizado para cada uma das composições com a finalidade de homogeneizar o material, fazendo com que as fibras ficassem dispersas no material. A Figura 4.5 exemplifica o processo de extrusão realizado. As temperaturas utilizadas no processo foram de 120°C na zona de alimentação, 135°C a 140°C na zona de compressão, 150°C na zona de homogeneização e 170°C no cabeçote.

Estas temperaturas foram próximas às utilizadas por Cerqueira (2006), reproduzindo o processo realizado em uma extrusora de rosca simples, que é mais encontrada em indústrias de reciclagem.

Figura 4.5 – Ilustração do processo de extrusão das composições.



Fonte: a autora

4.2.5 Conformação das amostras

Para avaliação das propriedades e características das composições preparadas foram conformados corpos-de-prova por injeção em uma injetora BOY, modelo 55M, com perfil de temperatura variando entre 150°C e 170°C.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.3.1 Ensaio de tração e flexão

Os corpos-de-prova foram obtidos por injeção em uma injetora BOY, modelo 55M. Para cada composição e processamento foram seguidas as condições estabelecidas nas normas D638M – 93. Os ensaios foram realizados através de

uma máquina universal de ensaios Shimadzu, modelo AG-1, com célula de carga de 10 kN e velocidade de travessa de 5 mm/min.

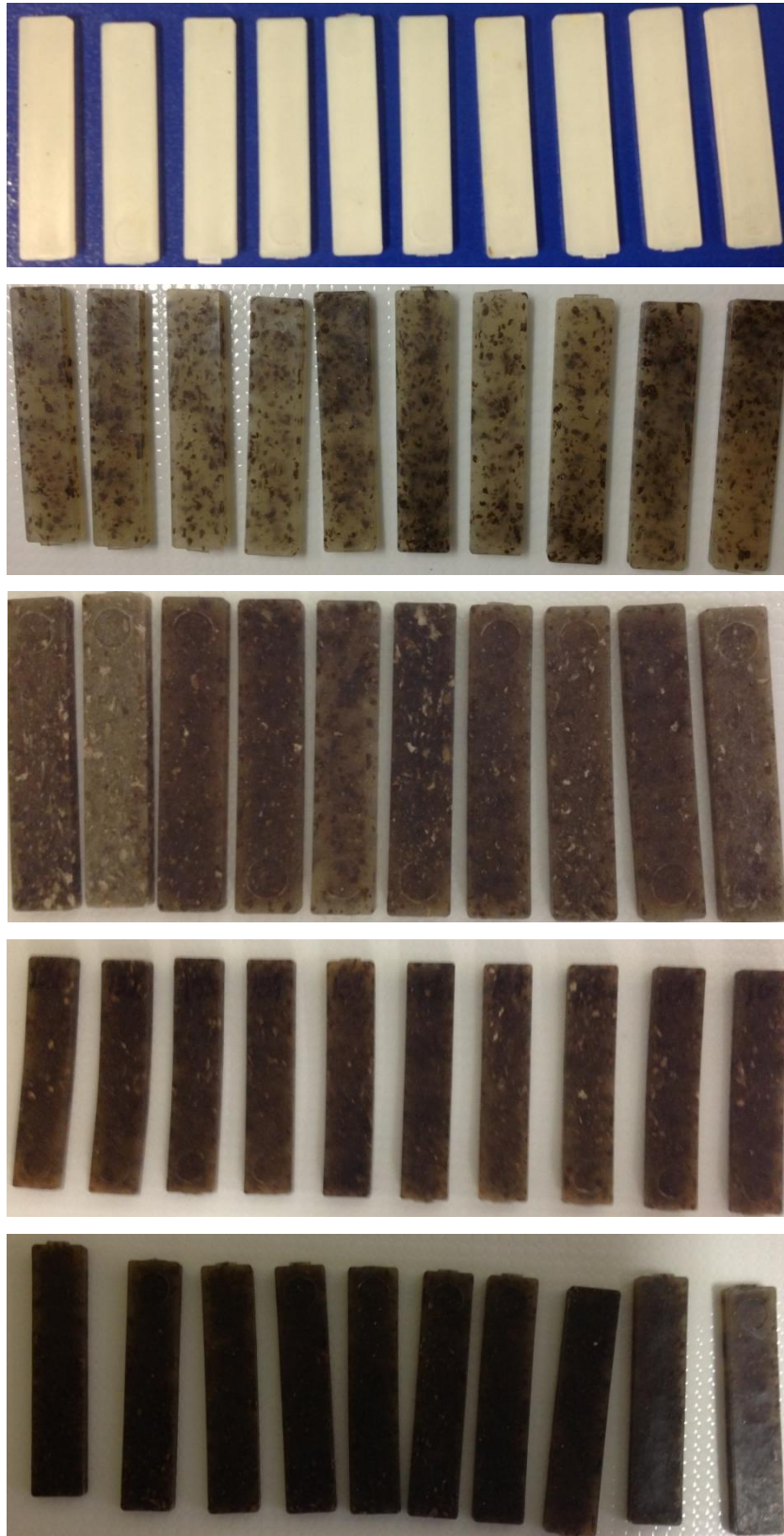
A Figura 4.6 mostra os corpos-de-prova conformados para o ensaio de tração das composições com 0%,5%, 10%, 15% e 20% de fibra, respectivamente. E, a Figura 4.7 os corpos-de-prova conformados para flexão.

Figura 4.6 - Corpos-de-prova conformados para ensaio de tração. Composição 0% de fibra, 5%, 10%, 15% e 20% de fibra respectivamente.



Fonte: a autora

Figura 4.7 - Corpos-de-prova conformados para ensaio de flexão. Composição 0% de fibra, 5%, 10%, 15% e 20% de fibra, respectivamente.



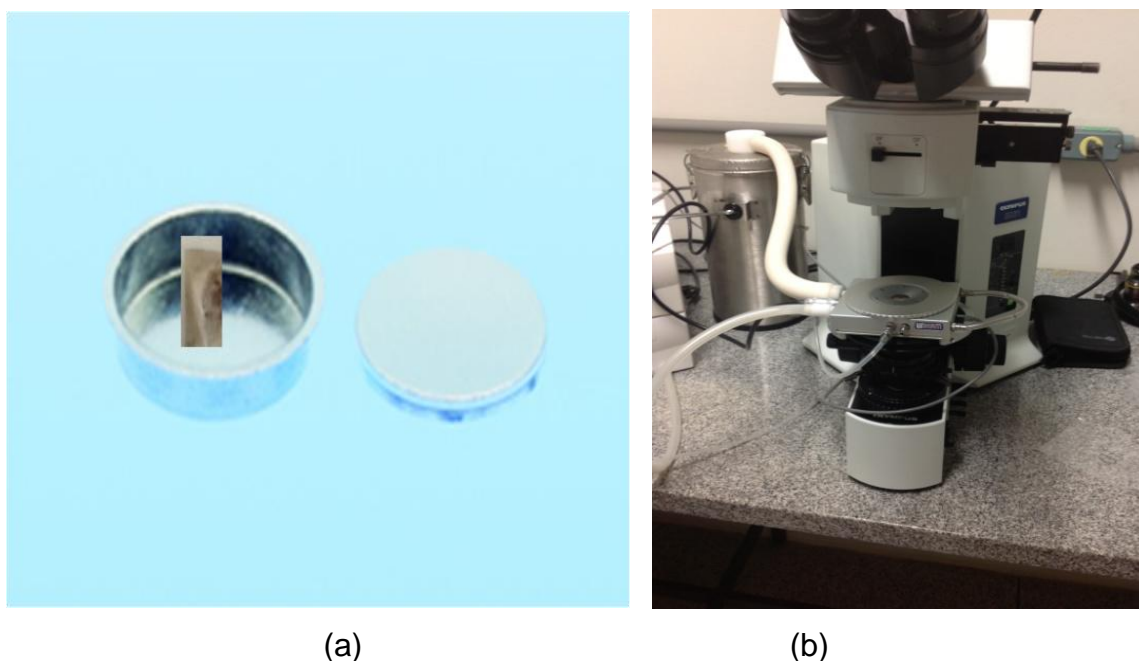
Fonte: a autora

4.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

4.4.1 DSC Hot Stage

Para a realização do ensaio de DSC na Hot Stage acoplada a microscópio ótico de luz polarizada Olympus foram preparadas amostras de aproximadamente 5 mg a partir dos corpos de prova injetados. As análises foram realizadas sob atmosfera de nitrogênio, com taxas de aquecimento de 10 °C/min até a temperatura de 160 °C onde as amostras permaneceram por 5 minutos. Logo após as amostras foram resfriadas a 10 °C/min até a temperatura ambiente. A Figura 4.8(a) e Figura 4.8(b) exemplificam esse processo.

Figura 4.8 – a) Amostra sendo preparada em cadinho de alumínio; b) Hot Stage DSC600 da Linkam acoplada a microscópio ótico.



Fonte: a autora

4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Esta técnica foi utilizada para análise da adesão entre os materiais de reforço na matriz polimérica. As micrografias foram obtidas em equipamento

Shimadzu modelo SSX-550 utilizando-se amostras provenientes dos corpos-de-prova injetados e vistos na superfície de fratura dos corpos ensaiados sob tração. As Figuras 4.9 a 4.13 mostram as amostras submetidas ao MEV para observação de suas superfícies.

Figura 4.9 – Amostra com 20% de fibra de papel preparada para ensaio MEV.



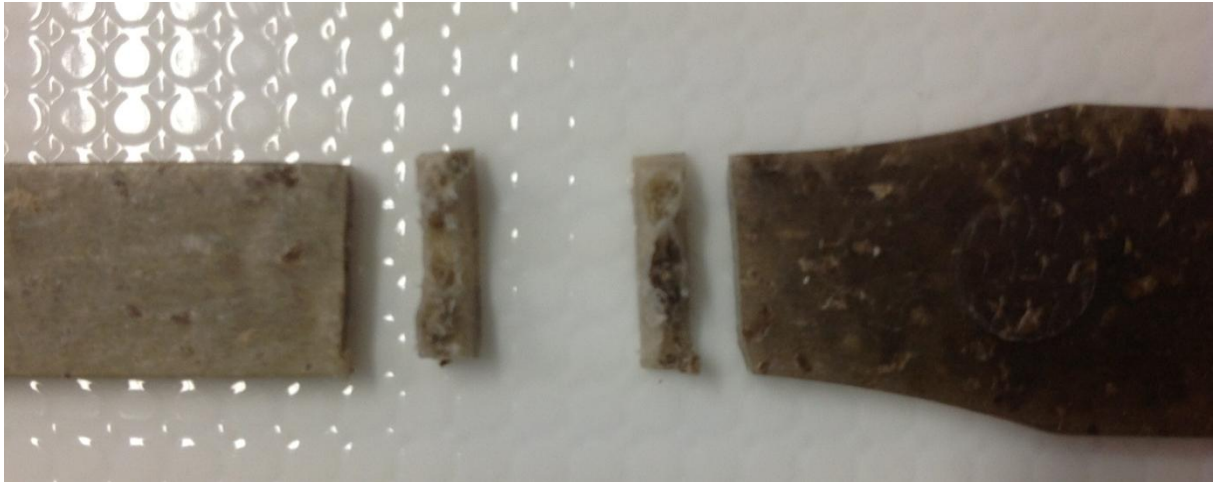
Fonte: a autora

Figura 4.10 – Amostra com 15% de fibra de papel preparada para ensaio MEV.



Fonte: a autora

Figura 4.11 – Amostra com 10% de fibra de papel preparada para ensaio MEV.



Fonte: a autora

Figura 4.12 – Amostra com 5% de fibra de papel preparada para ensaio MEV.



Fonte: a autora

Figura 4.13 – Amostra sem fibra de papel preparada para ensaio MEV.



Fonte: a autora

4.4.3 Ensaio de Infravermelho - FTIR

Com a finalidade de caracterizar em termos de degradação o polietileno reciclado utilizado na preparação das composições estudadas neste trabalho de pesquisa, foi realizado o ensaio de infravermelho por refletância e por transmitância em equipamento Shimadzu FTIR Prestige 21. Para a realização deste ensaio foram preparados filmes do polímero virgem e do polímero reciclado em uma prensa térmica a 160°C com pressão de 4 bar, conforme mostram as Figuras 4.14 e 4.15, respectivamente.

Figura 4.14 – Filme de polietileno virgem.



Fonte: a autora

Figura 4.15 – Filme de polietileno reciclado.



Fonte: a autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

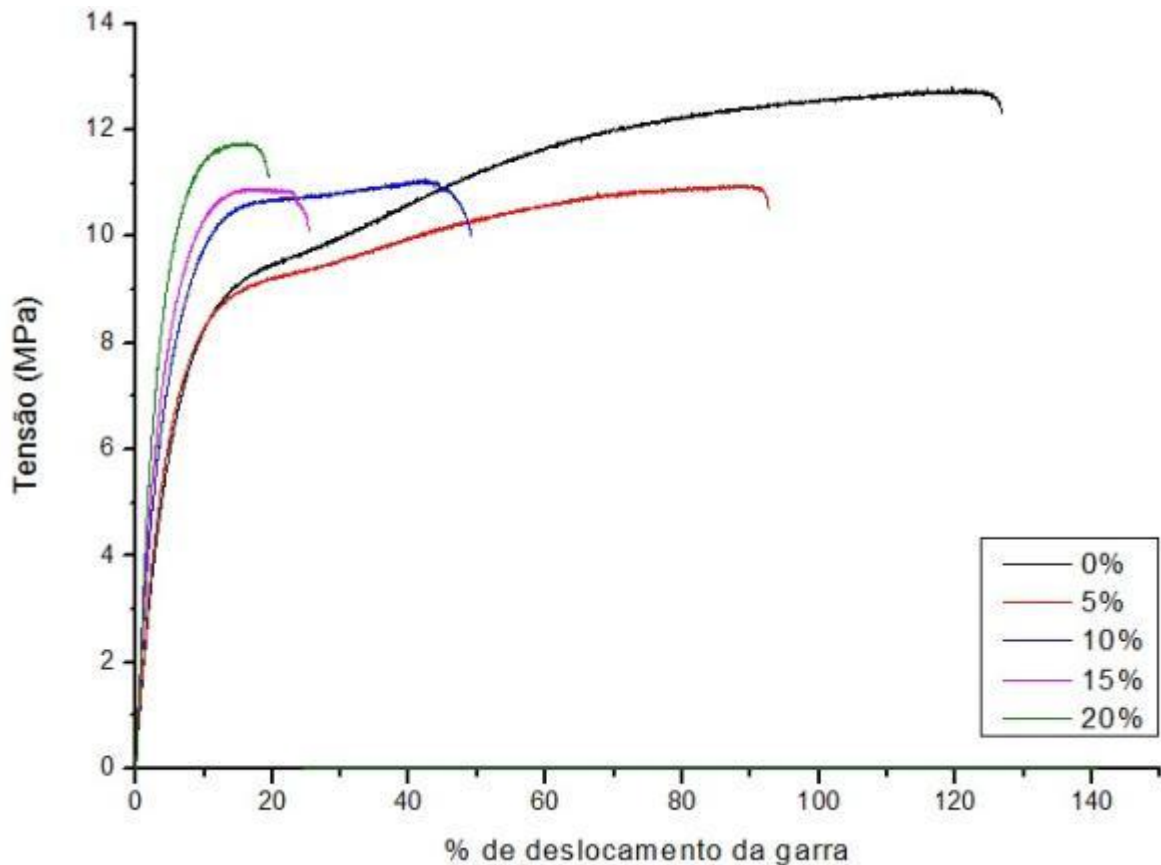
5.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Entre os ensaios mecânicos foram realizados ensaio de tração e ensaio de flexão.

5.1.1 Tração

A Figura 5.1 mostra o gráfico construído a partir do resultado do ensaio de tração realizado nas composições com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de fibra na matriz de polietileno reciclado.

Figura 5.1 - Gráficos representando curvas típicas do ensaio de tração realizado nas composições sem fibra e com adição de porcentagens variando de 5% a 20% de fibra de papel.

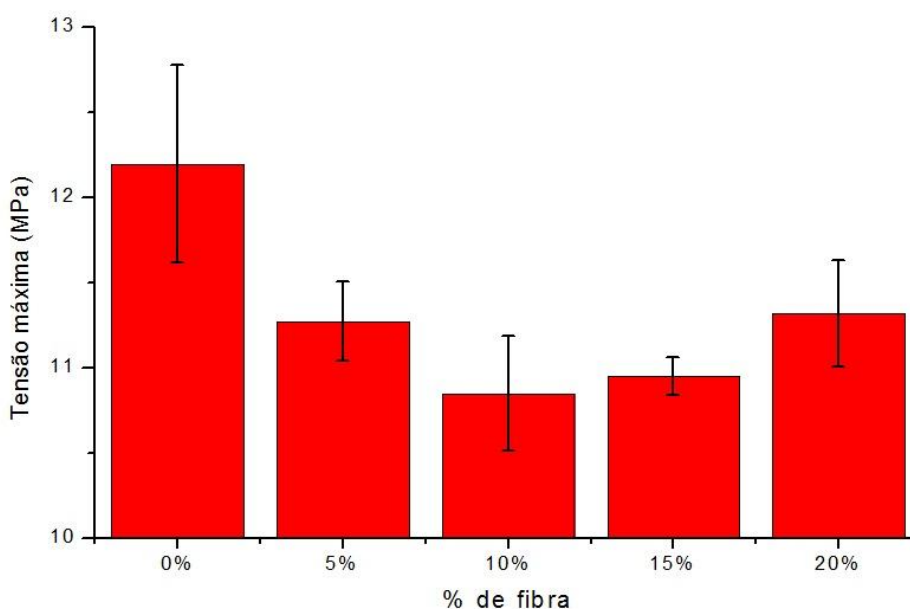


Fonte: a autora

A Figura 5.1 e o gráfico da Figura 5.2 mostram que a incorporação de fibras de papel promoveu uma diminuição na tensão máxima suportada, quando comparado ao polietileno puro. No caso do alongamento na ruptura, a quantidade de fibra de papel também influenciou de forma negativa, sendo que o aumento na porcentagem de fibras presentes nas composições fez com que mais rápido os corpos de prova se rompessem.

A Figura 5.2 representa a tensão máxima das composições estudadas.

Figura 5.2– Tensão máxima no ensaio de tração para as composições de polietileno puro e seus compósitos com fibra de papel.



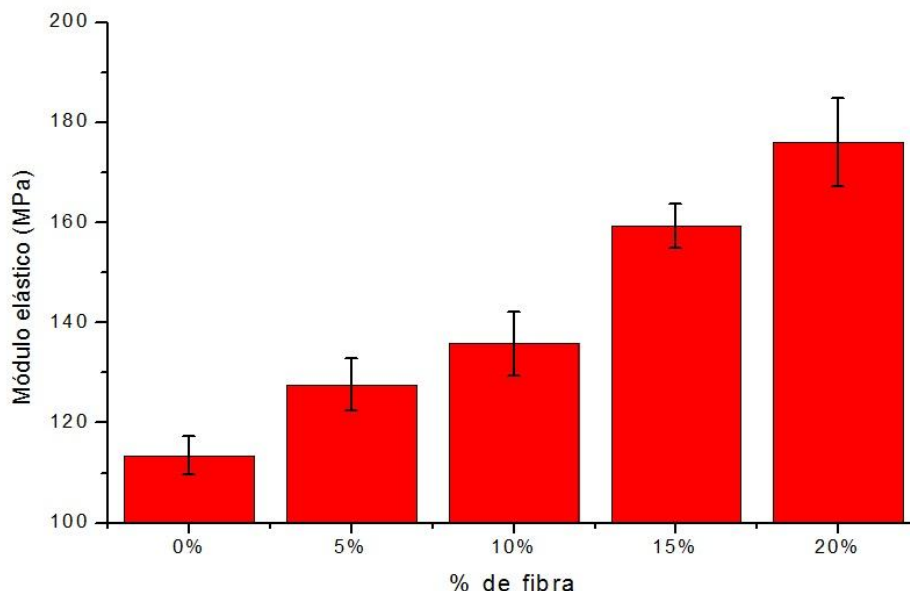
Fonte: a autora

Segundo o gráfico da Figura 5.2, verifica que entre o polietileno puro e a composição de 5% fibra de papel houve redução da tensão máxima suportada. Possivelmente essa redução se deve ao fato da diminuição do alongamento na ruptura promovido pelas fibras de papel, fazendo com que a ruptura ocorra numa condição onde a matriz de polietileno está menos orientada. Na Figura 5.2 as composições com 15% e 20% de fibra de papel adicionadas possuem maior tensão máxima suportada em relação a composição com 10% de fibra. Entretanto, com base nos desvios padrões, esse incremento na tensão não deve ser considerado estatisticamente significativo.

Os resultados obtidos no ensaio de tração seguiram a mesma tendência apresentada no estudo realizado por Cerqueira (2006), onde o incremento de pó de madeira na matriz de PE/Al aumentou a rigidez do material e diminuiu o alongamento na ruptura (regime plástico), demonstrando que o aumento da quantidade de pó de madeira diminui a ductilidade do material. Estes resultados também são coerentes com os obtidos por Habibi e colaboradores (2008), que estudaram o efeito da incorporação de diversas fibras lignocelulósicas tais como algodão, casca de arroz, bagaço de cana e fibras de casca de banana na produção de compósitos com PEBD.

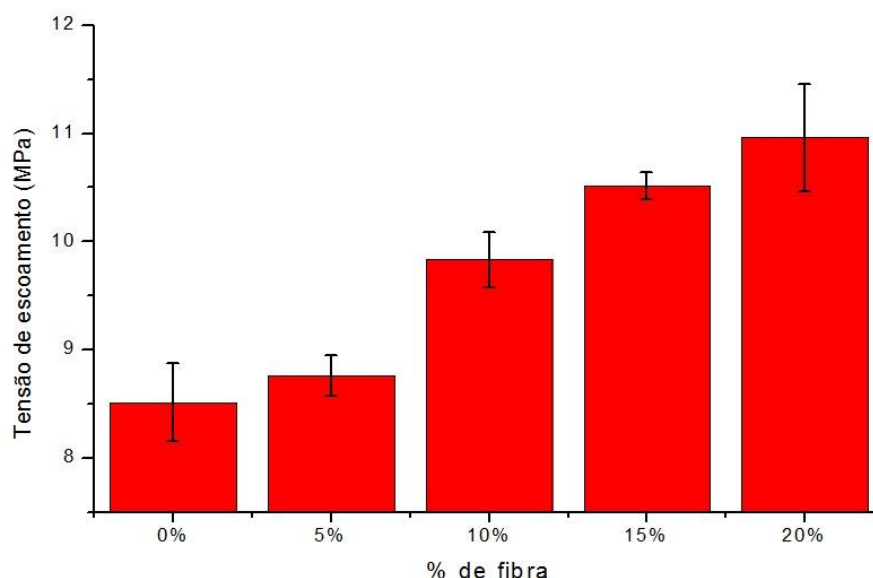
As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os resultados para o ensaio de tração no regime elástico, onde é possível observar as características mais importantes do material quando se pensa em aplicações para o mesmo, pois normalmente componentes são dimensionados para uso em condições onde não apresentam deformações permanentes. Assim, módulo elástico e tensão de escoamento, tomada como divisor do comportamento elástico-plástico, são essenciais.

Figura 5.3 – Módulo elástico para as composições preparadas e ensaiadas por tração.



Fonte: a autora

Figura 5.4 – Tensão de escoamento das composições durante ensaio de tração.



Fonte: a autora

Através dos gráficos representados nas Figuras 5.3 e 5.4 é possível observar que a adição de fibras de celulose na matriz de polietileno proporciona aumento significativo no módulo elástico e na tensão de escoamento do compósito em relação ao polietileno puro. O módulo elástico comprova o aumento na rigidez do material com adição das fibras de celulose, semelhante ao obtido através do estudo de Pourboghrat e Misra (2006) que analisaram compósitos de PHBV e celulose, onde houve incremento no módulo elástico com a adição da fibra de celulose. Este resultado também é coerente com o observado por Habibi e colaboradores (2008) em compósitos de PEBD e diversas fibras lignocelulósicas.

A literatura apresenta alternativas que poderiam melhorar a compatibilidade das fibras com a matriz, como modificar mecanicamente as fibras obtendo ancoragem mecânica (por exemplo, KARLSSON et al, 1996), através de agentes compatibilizantes (por exemplo, GAUTHIER et al, 1998 e) ou modificações químicas nas fibras (por exemplo, PASQUINI et al, 2008). Entretanto, com a simples adição de fibras, mesmo sem uma boa aderência entre as fases (como observado através da microscopia eletrônica de varredura, seção 5.2.2), ainda sim no presente trabalho se obteve incremento no módulo elástico e na tensão de escoamento da matriz de PEBD.

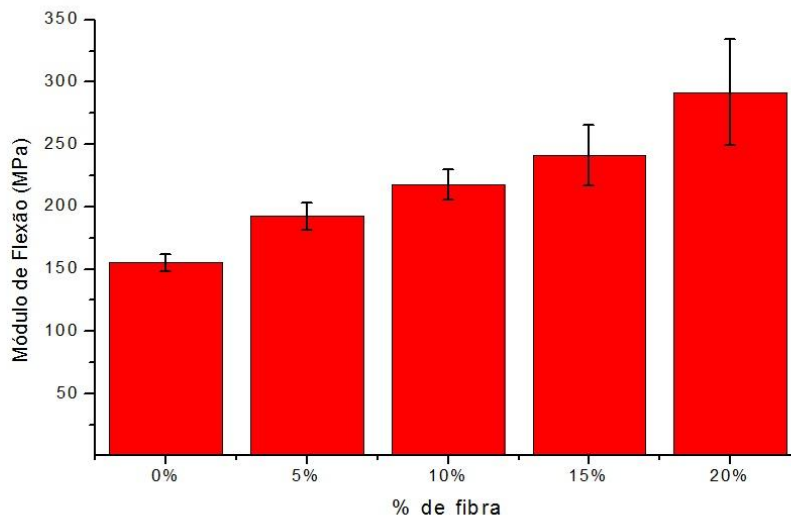
De acordo com Abdelmouleh et al (2007), baseado na teoria de compósitos, fibras de reforço têm pouca influência sobre o módulo de elasticidade do compósito até que o comprimento crítico seja alcançado. Acima deste, o módulo cresce rapidamente e atinge um segundo patamar próximo ao de compósitos de fibras contínuas. Portanto, os resultados obtidos no presente trabalho indicam que as fibras empregadas apresentam tamanho superior ao crítico, pois um significativo aumento de módulo em relação à matriz pura foi obtido.

Juntamente com o aumento de módulo elástico, a Figura 5.4 mostra um outro excelente efeito da adição das fibras, que proporcionaram aumento expressivo na resistência do material em termos de tensão de escoamento. Considerando que o baixo módulo e a baixa tensão de escoamento são grandes limitantes do uso do PEBD em diversas aplicações, estes resultados trazem boas características para uso em produtos que o polietileno puro não atenderia as especificações. Deve-se ressaltar que tais resultados foram obtidos sem condições especiais de preparo das formulações, tendo sido utilizada extrusora de rosca simples, sem compatibilizantes e sem condições especiais de preparo das fibras de papel. Portanto, há potencial para melhoria adicional de propriedades em relação às já obtidos no presente estudo.

5.1.2 Flexão

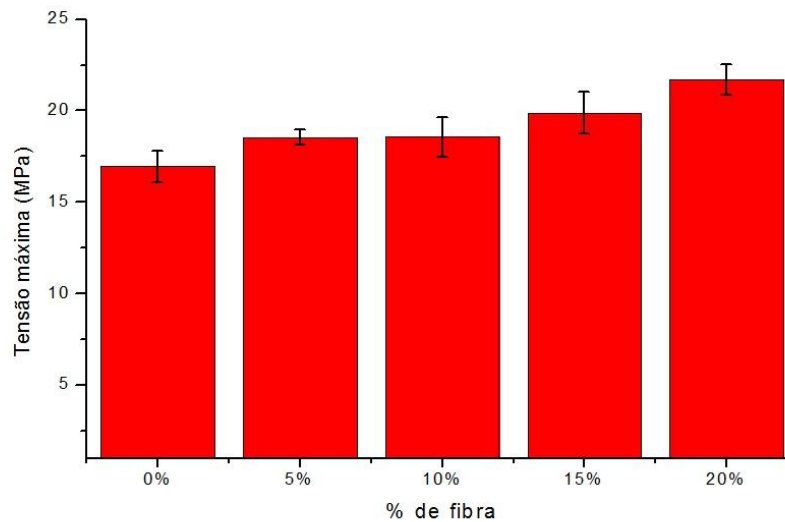
As Figuras 5.5 e Figura 5.6 mostram a representação dos resultados obtidos através do ensaio de flexão nas amostras com diferentes teores de fibra de papel, variando de 0% a 20%.

Figura 5.5 – Módulo de flexão das composições de PEBD/fibra de papel.



Fonte: a autora

Figura 5.6 – Tensão máxima suportada pelas composições durante ensaio de flexão.



Fonte: a autora

O ensaio de flexão realizado nas composições preparadas mostra, conforme Figuras 5.5 e 5.6, que o aumento na quantidade de fibras proporciona aumento no módulo de flexão e na tensão máxima suportada pelos corpos de prova, confirmando os resultados já apresentados no ensaio de tração.

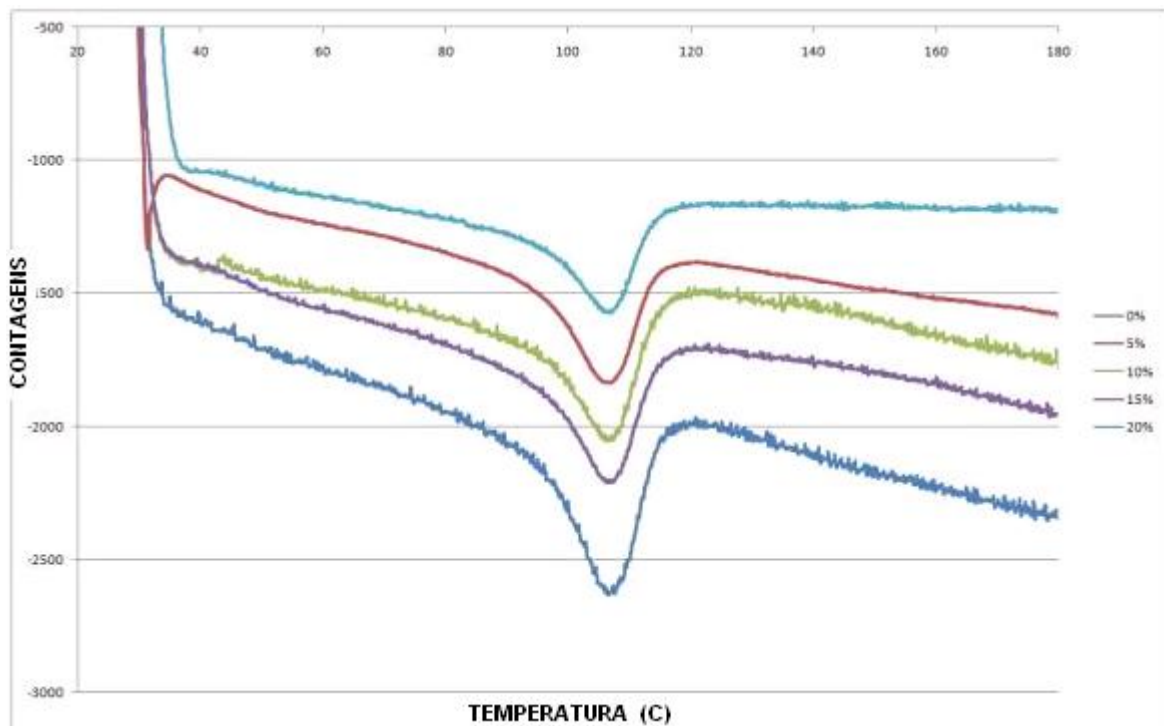
Em comparação com o estudo realizado por Cerqueira (2006), confirma-se esta tendência apesar da diferença das matrizes (PE neste estudo e PE/Al no estudo comparado) e também pelo fato de naquele trabalho ter sido utilizado pó de madeira e não fibras de celulose oriundas de papel.

5.2 ENSAIOS MORFOLÓGICOS

5.2.1 DSC Hot Stage

Este ensaio foi realizado com objetivo de avaliar se a adição de fibra de papel poderia exercer influência na cristalização da matriz de polietileno. As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam as curvas de aquecimento e resfriamento, respectivamente, do ensaio de DSC Hot Stage.

Figura 5.7 – Termograma em DSC Hot Stage das composições de PEBD reciclado puro, 5% a 20% de fibra de papel durante aquecimento até 180°C numa taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: a autora

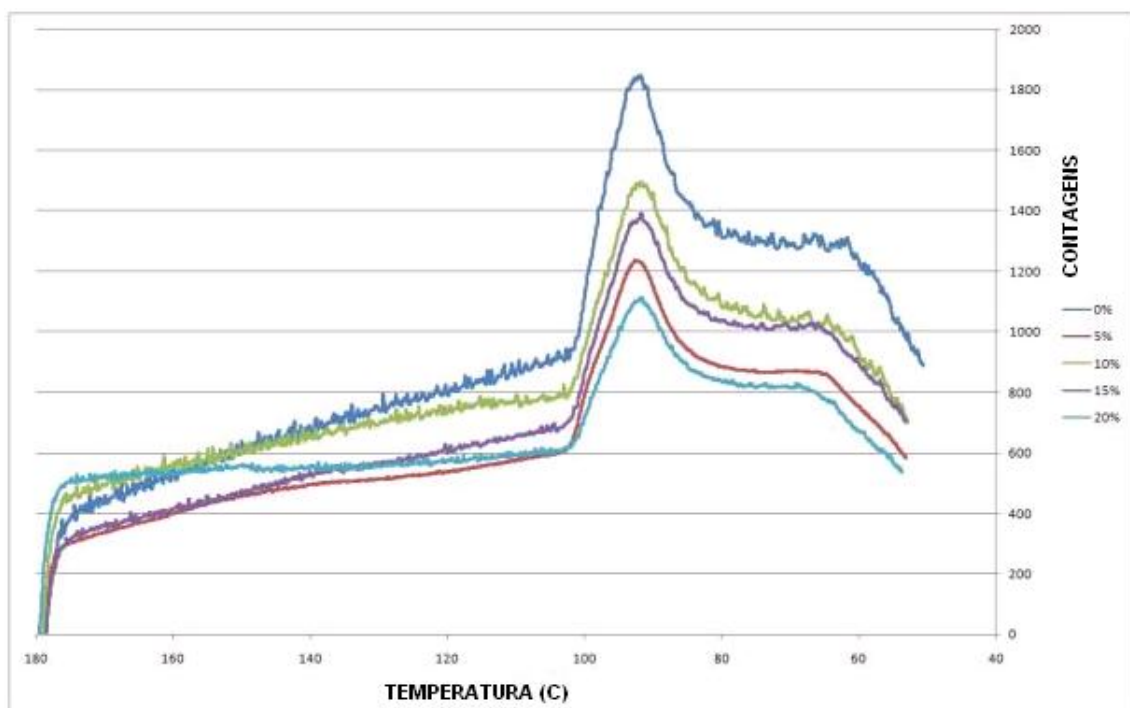
Através do gráfico representado na Figura 5.7 referente ao aquecimento das composições foi possível verificar que a temperatura de fusão ocorreu em torno de 106 e 107°C para todas as composições, com pequenas variações que não devem ser vistas como significativas, como mostra a Tabela 5.1. Isso demonstra que a quantidade de fibras de papel adicionada às composições não exerceu influência sobre a matriz de polietileno, confirmando o que havia sido verificado no estudo de Pasquini et al (2008).

Tabela 5.1 Variação de temperaturas de fusão do PEBD nas composições estudadas durante aquecimento até 180°C com taxa de aquecimento de 10°C/min.

| Composições | Temperaturas |
|--------------------|--------------|
| PE puro | 106,6°C |
| 5% Fibra de Papel | 106,5°C |
| 10% Fibra de Papel | 106,2°C |
| 15% Fibra de Papel | 107°C |
| 20% Fibra de Papel | 106,8°C |

Fonte: a autora

Figura 5.8 – Termograma em DSC Hot Stage das composições de PEBD puro, 5% a 20% de fibra de papel durante resfriamento até 30°C com taxa de 10°C/min.



Fonte: a autora

Na Figura 5.8 estão representados os gráficos das curvas de resfriamento do ensaio de DSC Hot Stage. Neste caso a temperatura de cristalização ficou entre 91 e 92 °C para todas as composições, demonstrando que a fibra de papel não exerce influência sobre o processo de cristalização da matriz de PEBD. A Tabela 5.2 apresenta os dados de temperatura para composição no resfriamento mostrando a pequena variação entre as mesmas. De acordo com Pasquini et al (2008), resultados conflitantes são encontrados na literatura sobre a influência de fibras lignocelulósicas em matrizes poliméricas, havendo relatos de que tratamento de superfície e teor de lignina são importantes e influenciam se as fibras promovem ou dificultam o processo de cristalização.

Tabela 5.2 – Variação de temperaturas de cristalização das composições estudadas durante resfriamento até 30 °C com taxa de resfriamento de 10°C/min.

| Composições | Temperaturas |
|--------------------|--------------|
| PE puro | 92,1°C |
| 5% Fibra de Papel | 92,5°C |
| 10% Fibra de Papel | 91,7°C |
| 15% Fibra de Papel | 91,7°C |
| 20% Fibra de Papel | 91,9°C |

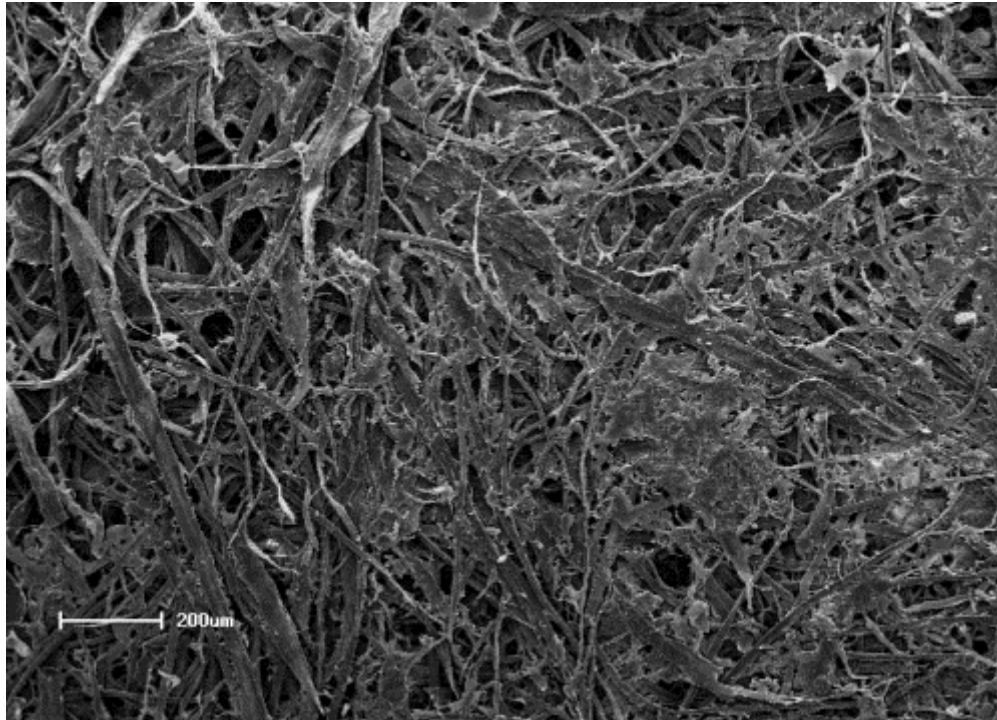
Fonte: a autora

5.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizado em todas as composições com o objetivo de verificar a distribuição e o ancoramento das fibras de papel na matriz de polietileno.

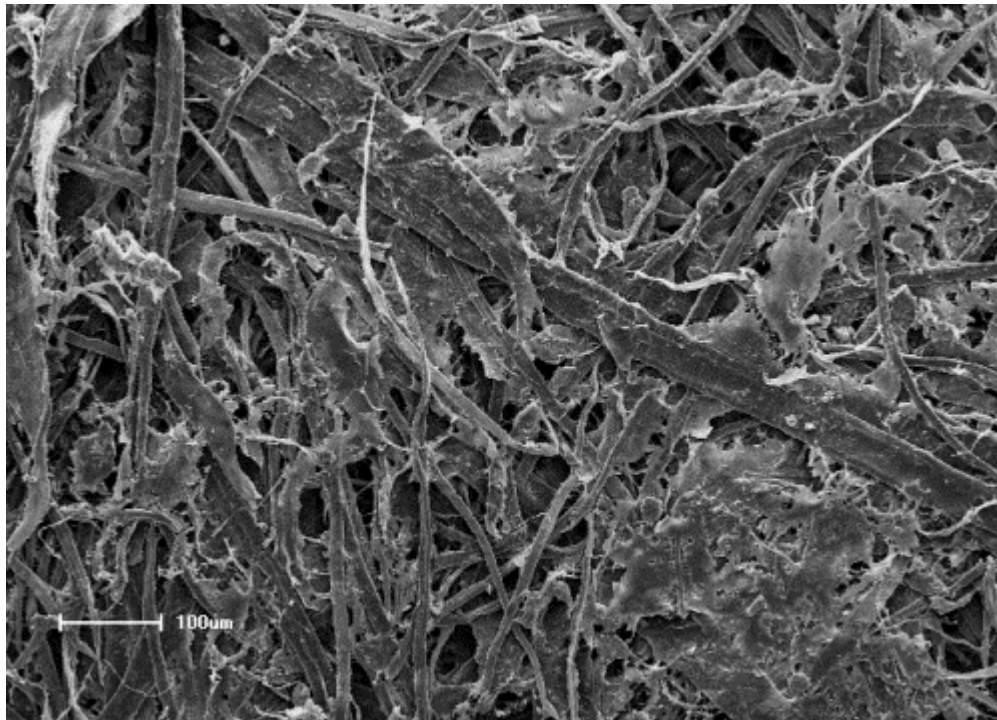
A Figura 5.9 e a Figura 5.10 representam a morfologia da fibra de papel pura após ser desaglomerada e seca em estufa, conforme procedimento citado no item 4.2.1, visando para avaliar o tamanho das fibras utilizadas para compor as amostras estudadas.

Figura 5.9 - Microscopia eletrônica de varredura de amostra de fibra de papel após processo de desaglomeração e secagem em estufa.



Fonte: a autora

Figura 5.10 – Microscopia eletrônica de varredura de amostra de fibra de papel após processo de desaglomeração e secagem em estufa.

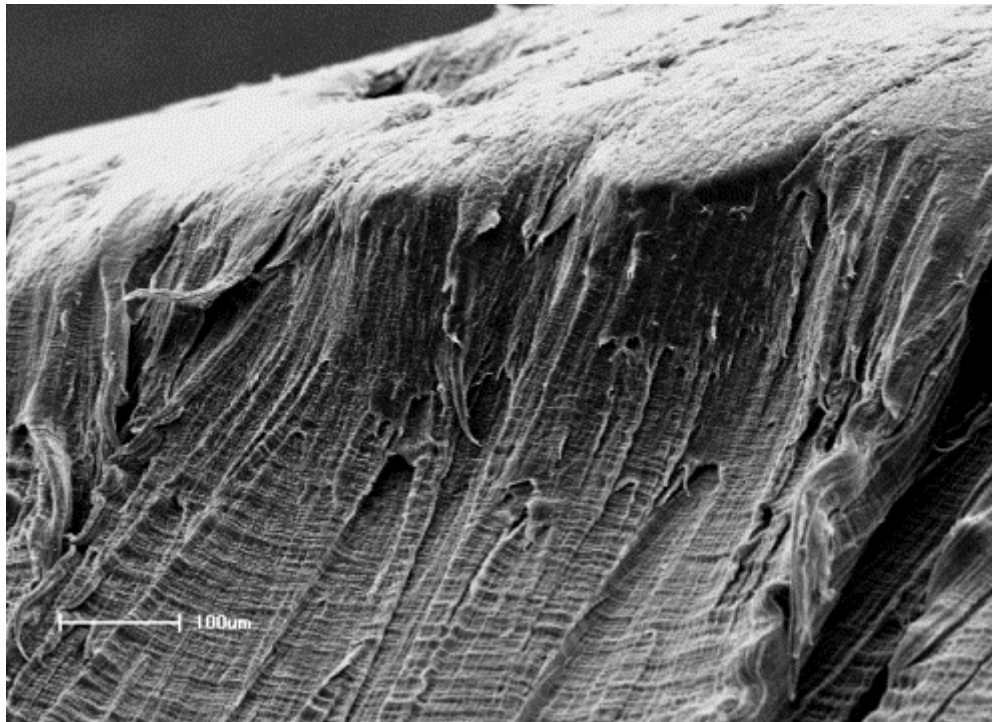


Fonte: a autora

Através das imagens das Figuras 5.9 e 5.10 é possível verificar que, como esperado, as fibras de celulose oriundas de primeira reciclagem de embalagens cartonadas são longas, o que tornam as composições mais resistentes conforme resultados apresentados nos ensaios de tração e flexão. As demais microscopias foram realizadas em amostras mostrando a superfície de fratura dos corpos de prova, tentando identificar a influencia da presença das fibras como pontos que ativaram a fragilidade das composições representadas nos corpos de prova.

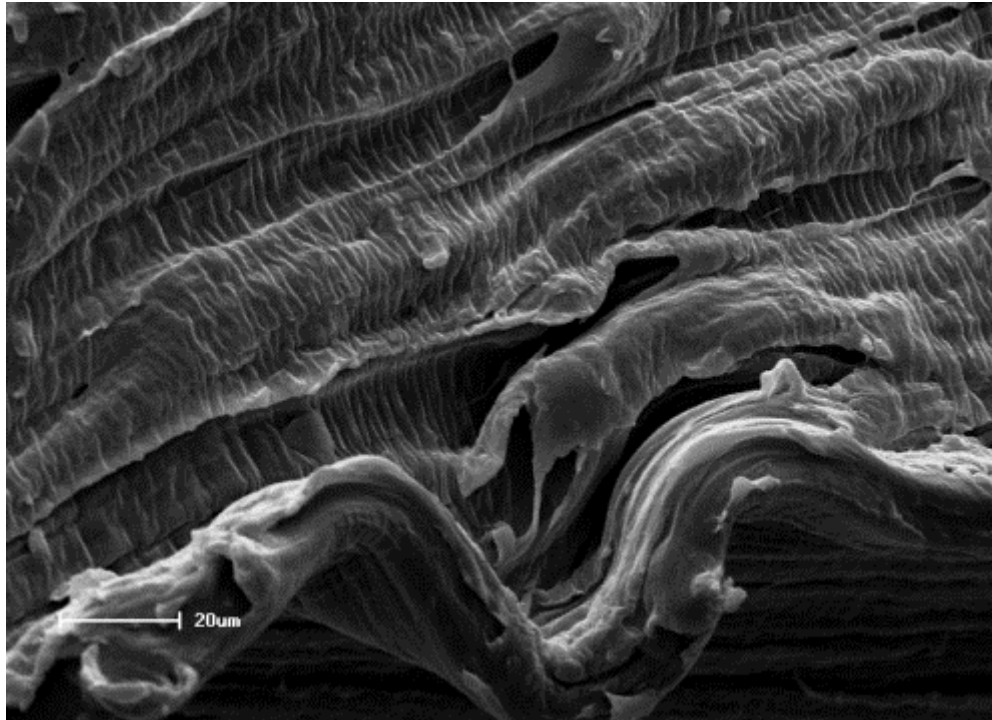
As Figuras de 5.11 a 5.24 representam as microscopias eletrônicas de varredura dos compósitos e do polietileno puro.

Figura 5.11 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno puro.



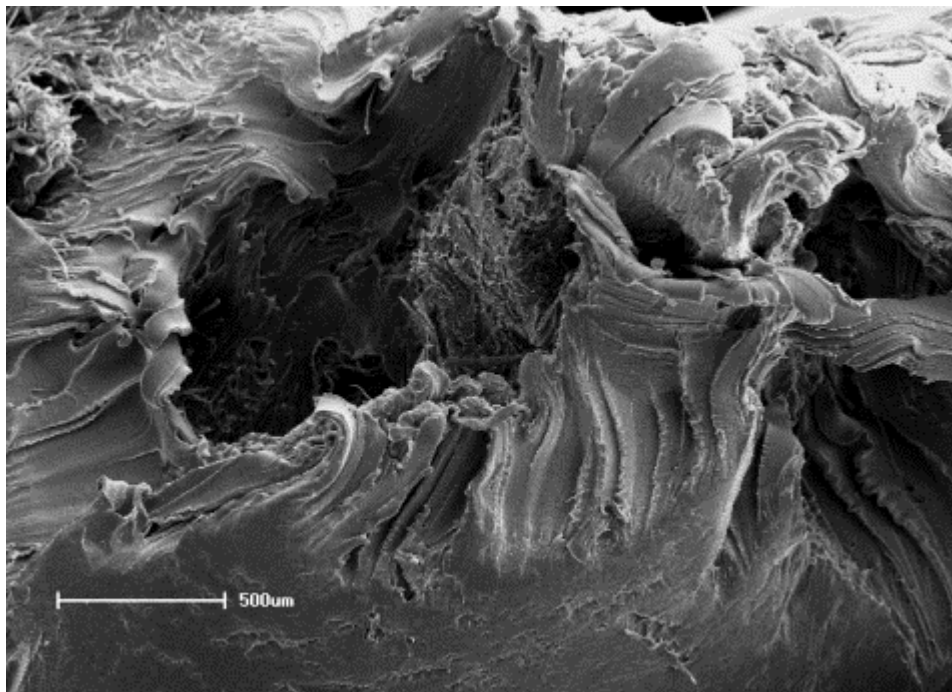
Fonte: a autora

Figura 5.12 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno puro.



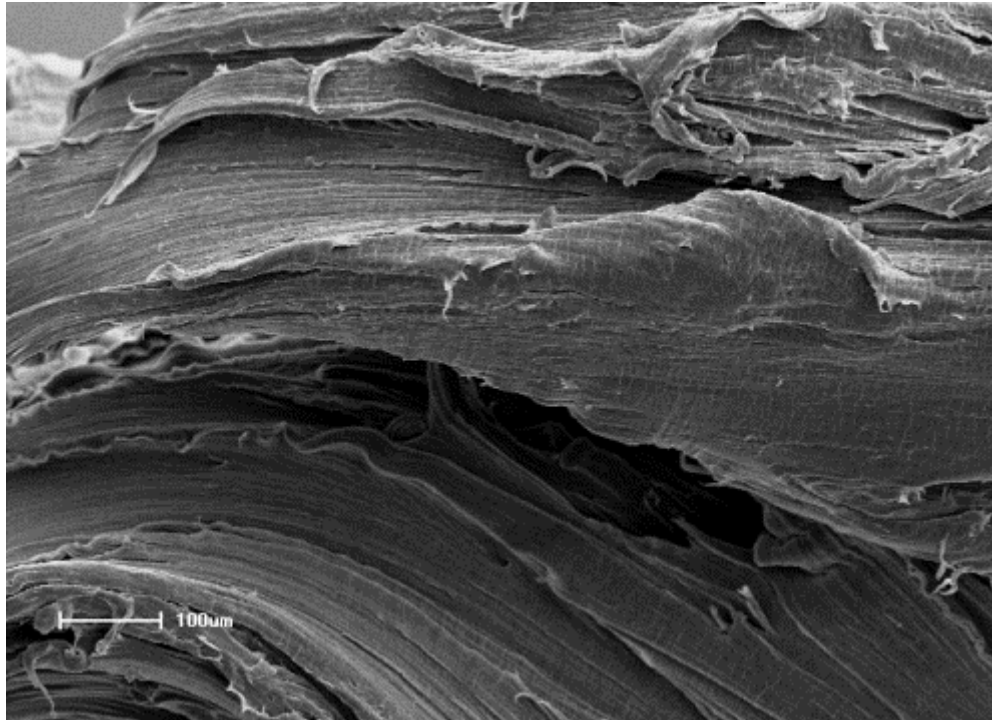
Fonte: a autora

Figura 5.13 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 5% fibra de papel.



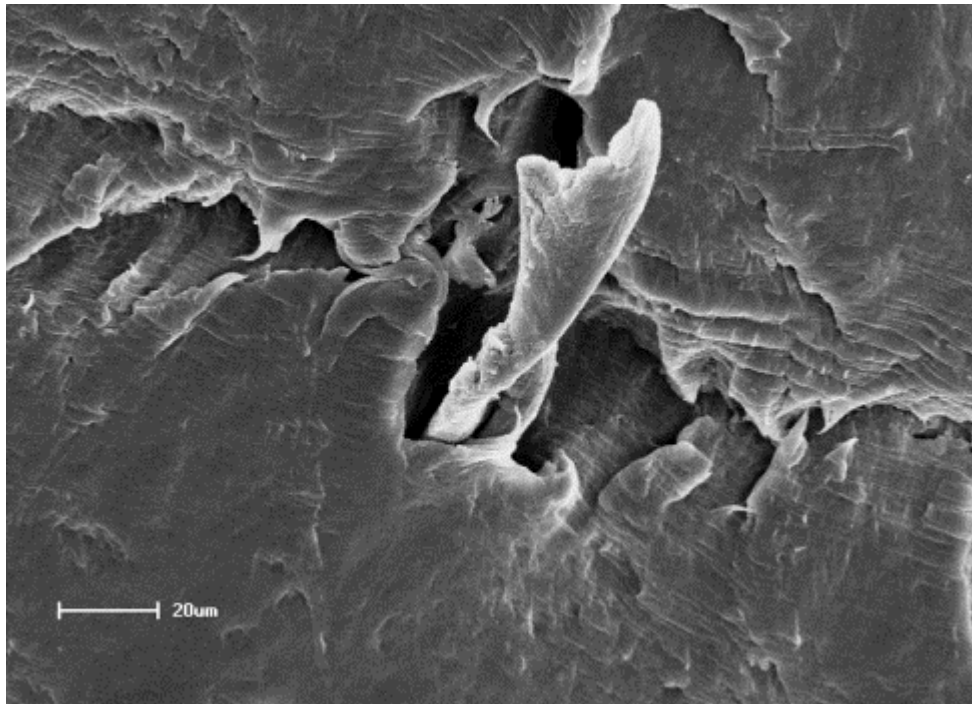
Fonte: a autora

Figura 5.14 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 5% fibra de papel.



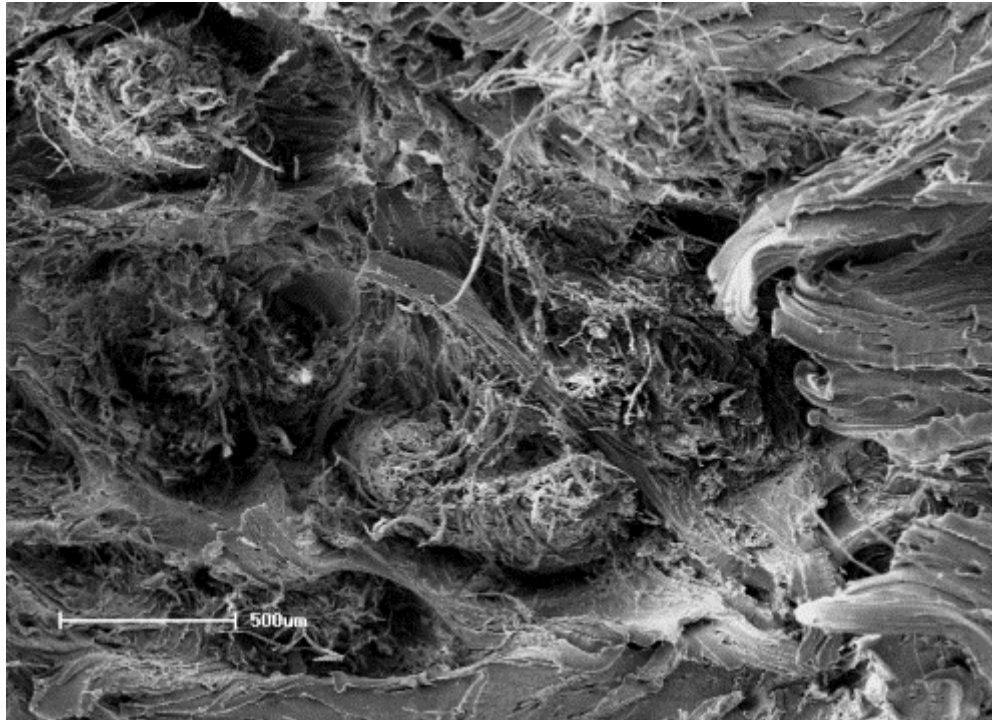
Fonte: a autora

Figura 5.15 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 5% fibra de papel.



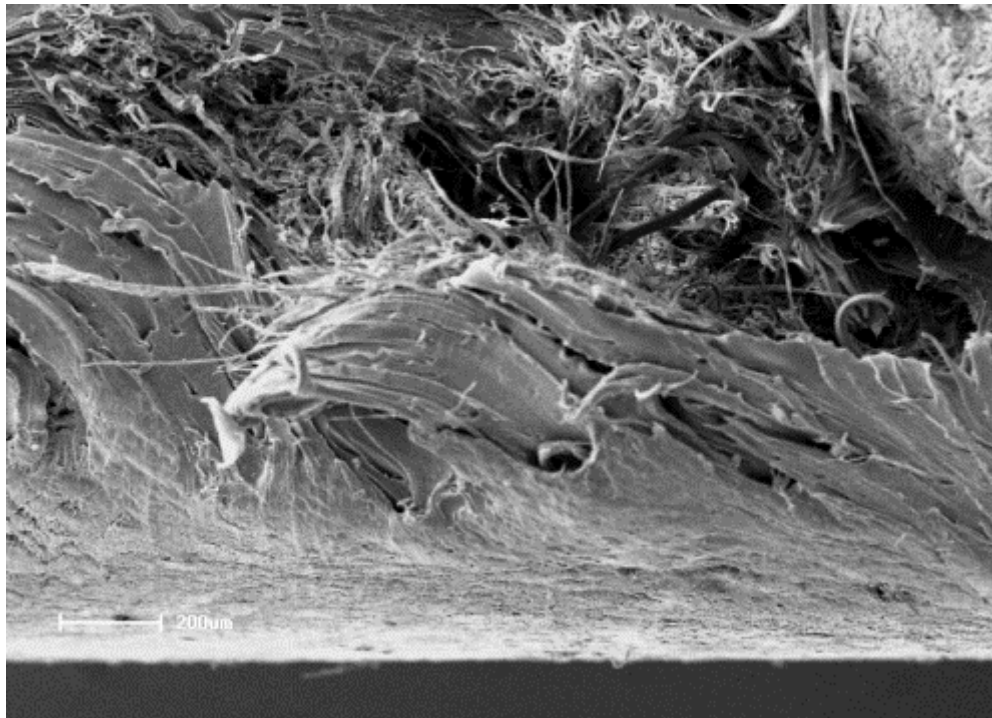
Fonte: a autora

Figura 5.16 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 10% fibra de papel.



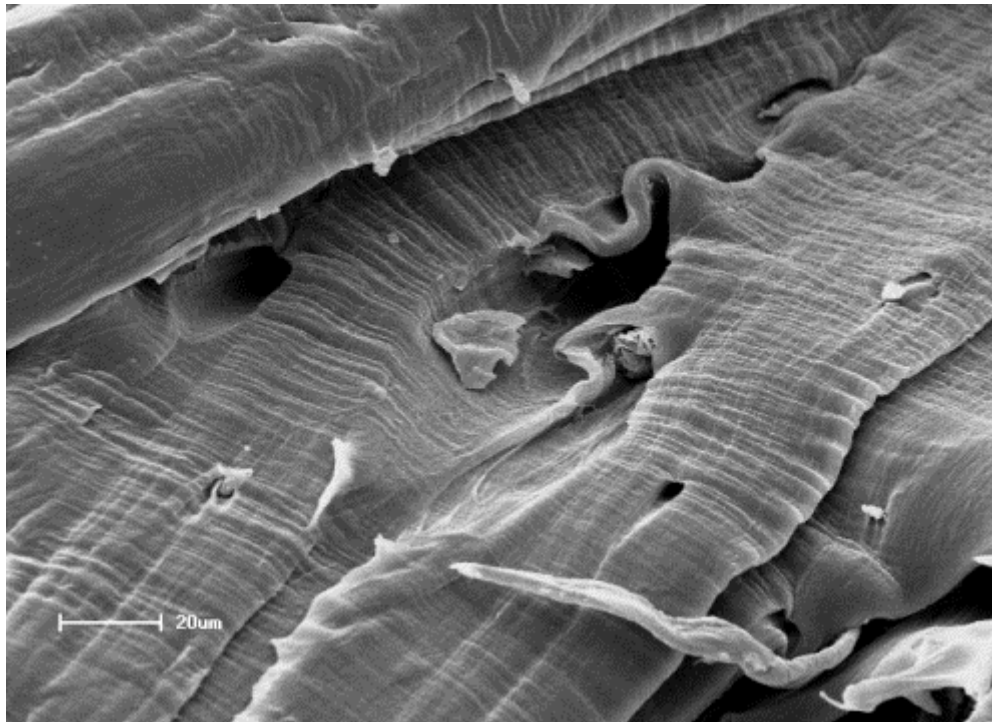
Fonte: a autora

Figura 5.17 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 10% fibra de papel.



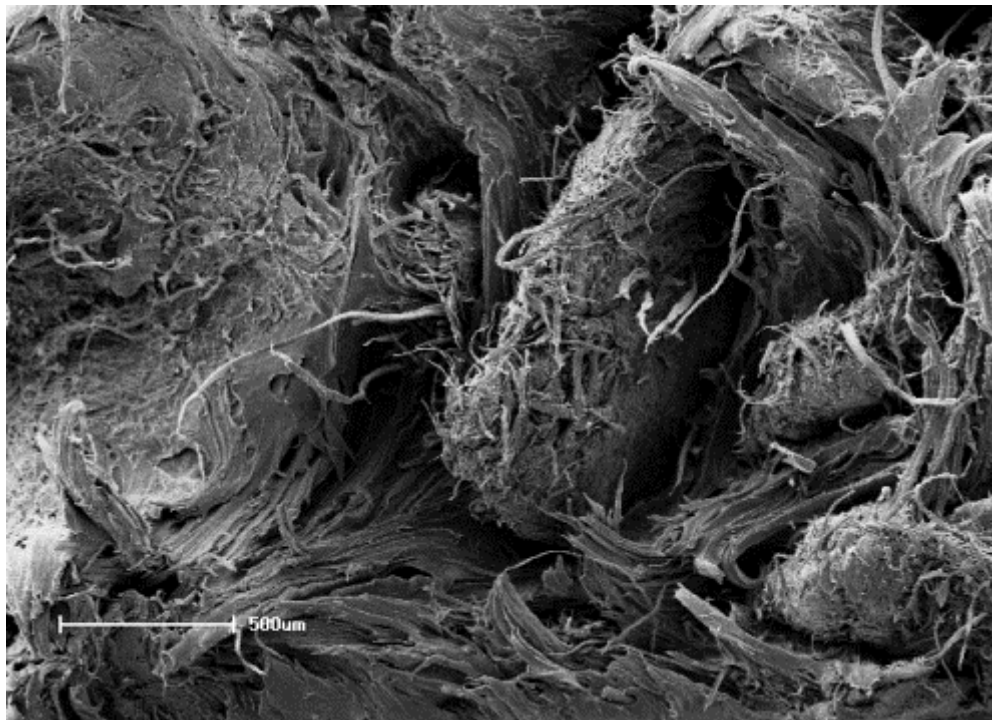
Fonte: a autora

Figura 5.18 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 10% fibra de papel.



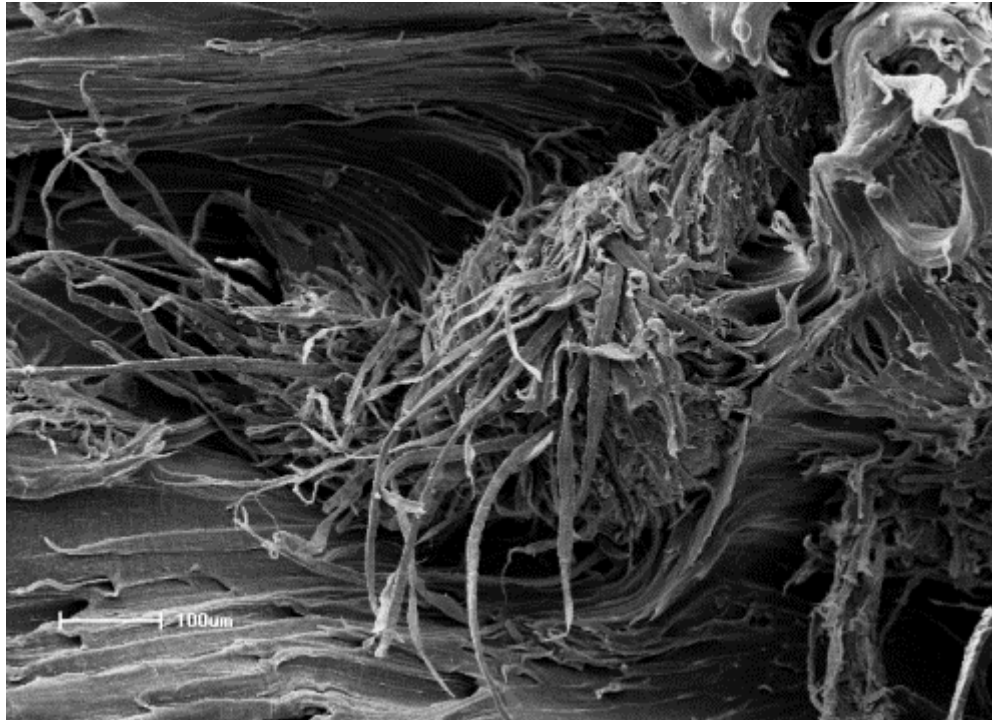
Fonte: a autora

Figura 5.19 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 15% fibra de papel.



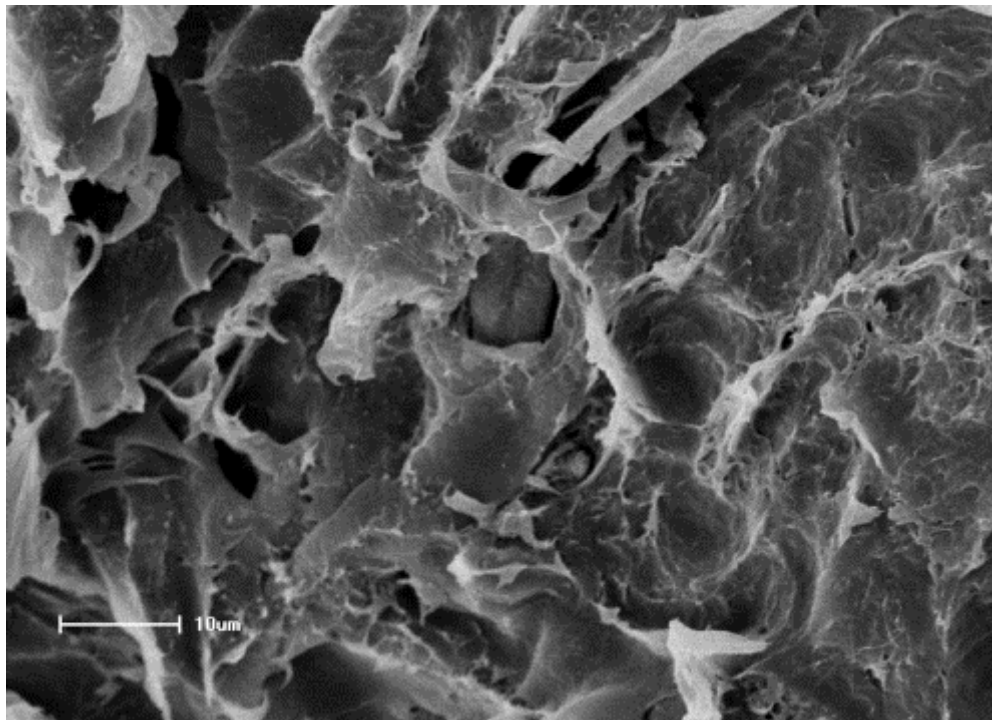
Fonte: a autora

Figura 5.20 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 15% fibra de papel.



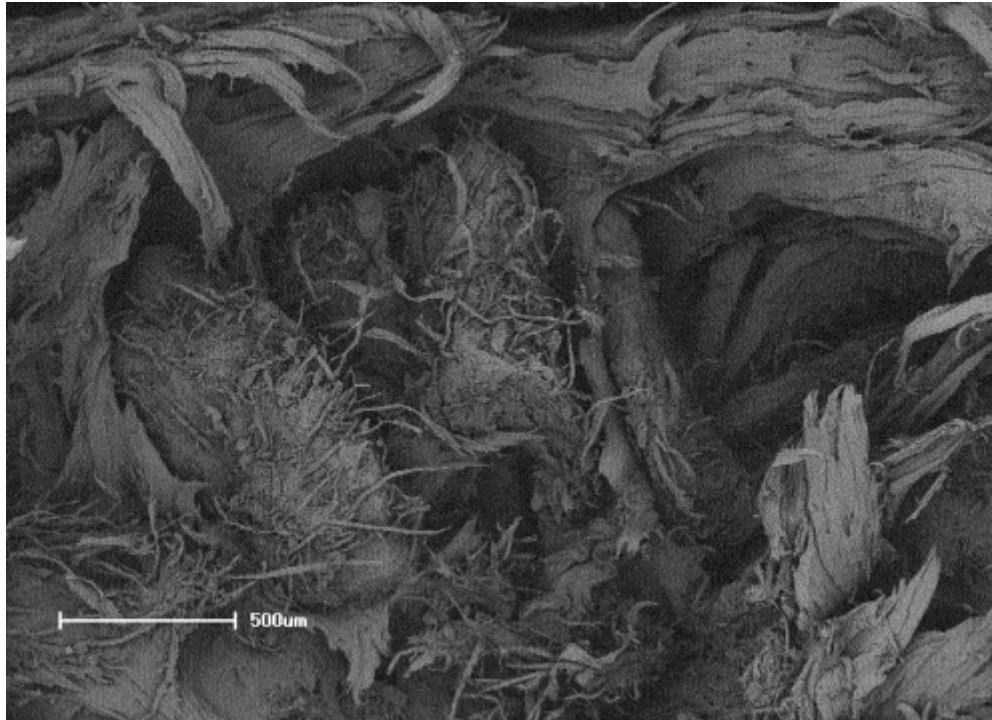
Fonte: a autora

Figura 5.21 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 15% fibra de papel.



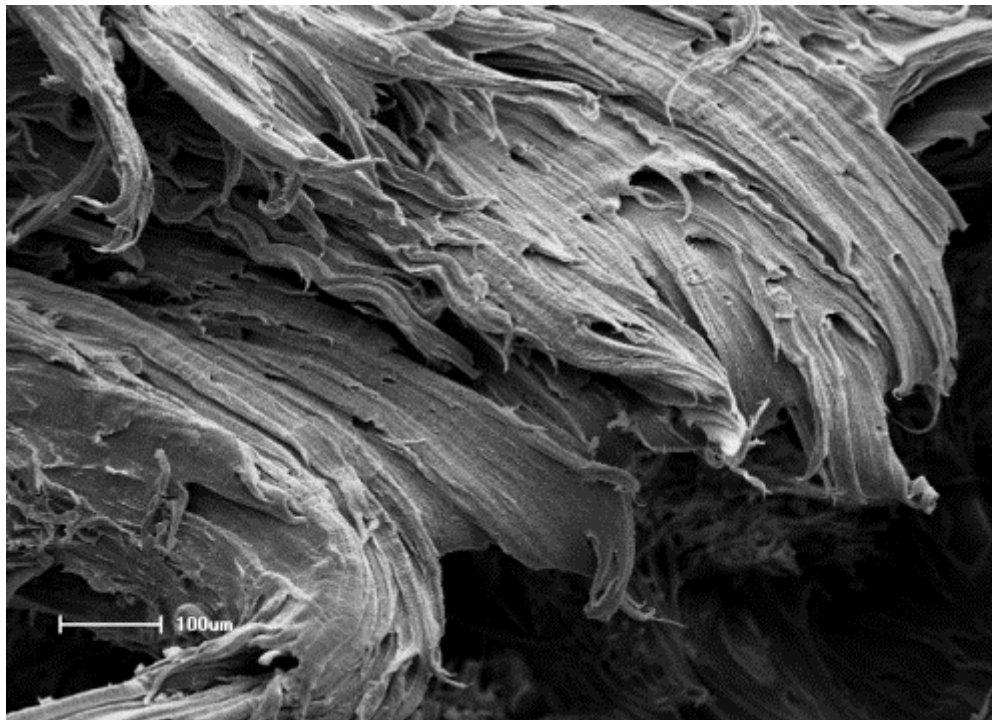
Fonte: a autora

Figura 5.22 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 20% fibra de papel .



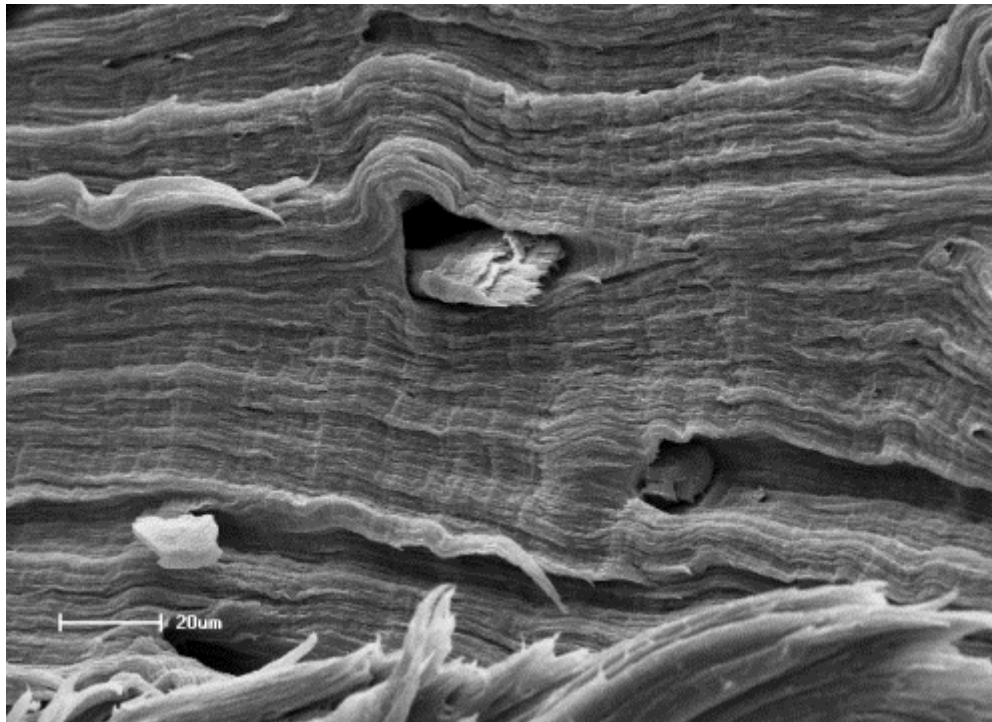
Fonte: a autora

Figura 5.23 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 20% fibra de papel.



Fonte: a autora

Figura 5.24 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura no ensaio de tração da amostra de polietileno com adição de 20% fibra de papel.



Fonte: a autora

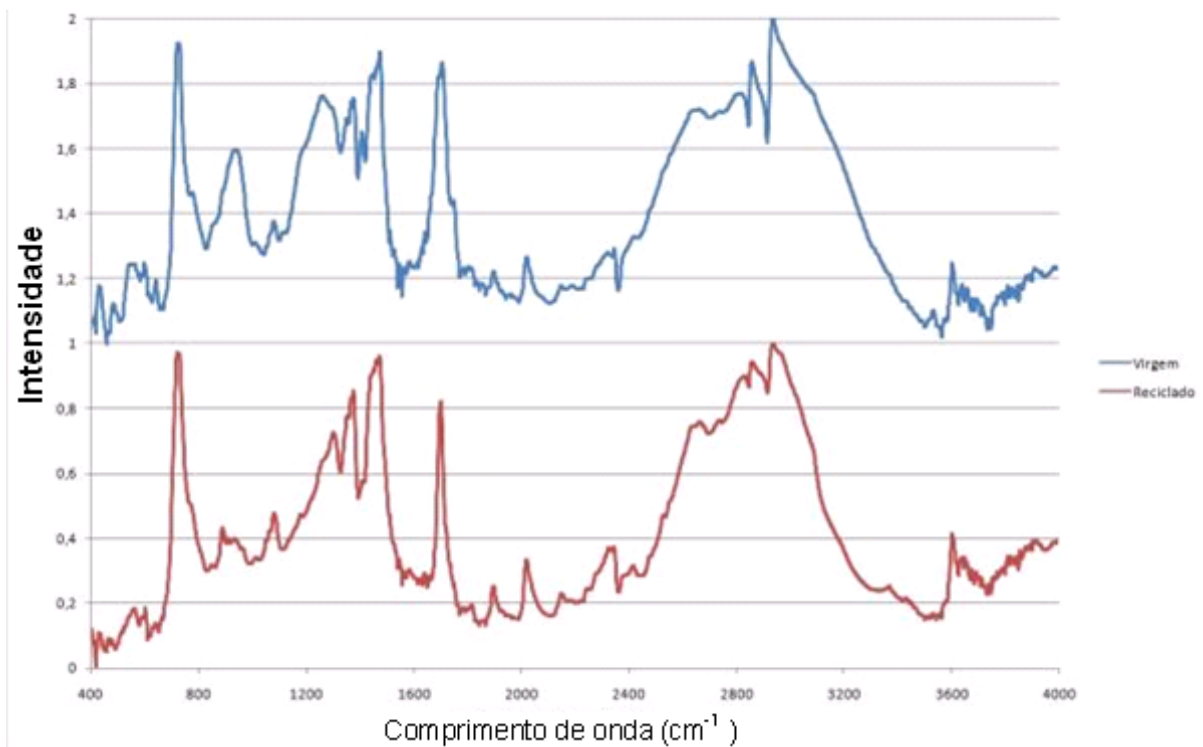
Analisando de forma geral as superfícies de fratura das composições propostas, com exceção da microscopia realizada na composição de polietileno puro, todas as microscopias apresentaram áreas com aglomerados de fibras de papel mostrando pouca dispersão deste material na matriz de polietileno. Esses aglomerados de fibra de papel são consequência do processo de preparação das composições e conformação dos corpos de prova. Isso foi relatado no item 4 deste estudo, onde foi apresentada a dificuldade de dispersar as fibras na matriz de PEBD durante a preparação.

De forma contrária, o estudo realizado por Cerqueira (2006) mostrou microscopias com pó de madeira bem distribuído na matriz de PE/Al, provavelmente em função de ter sido empregado agente compatibilizante e também pela menor tendência de aglomeração deste pó.

5.2.3 Espectroscopia no Infravermelho

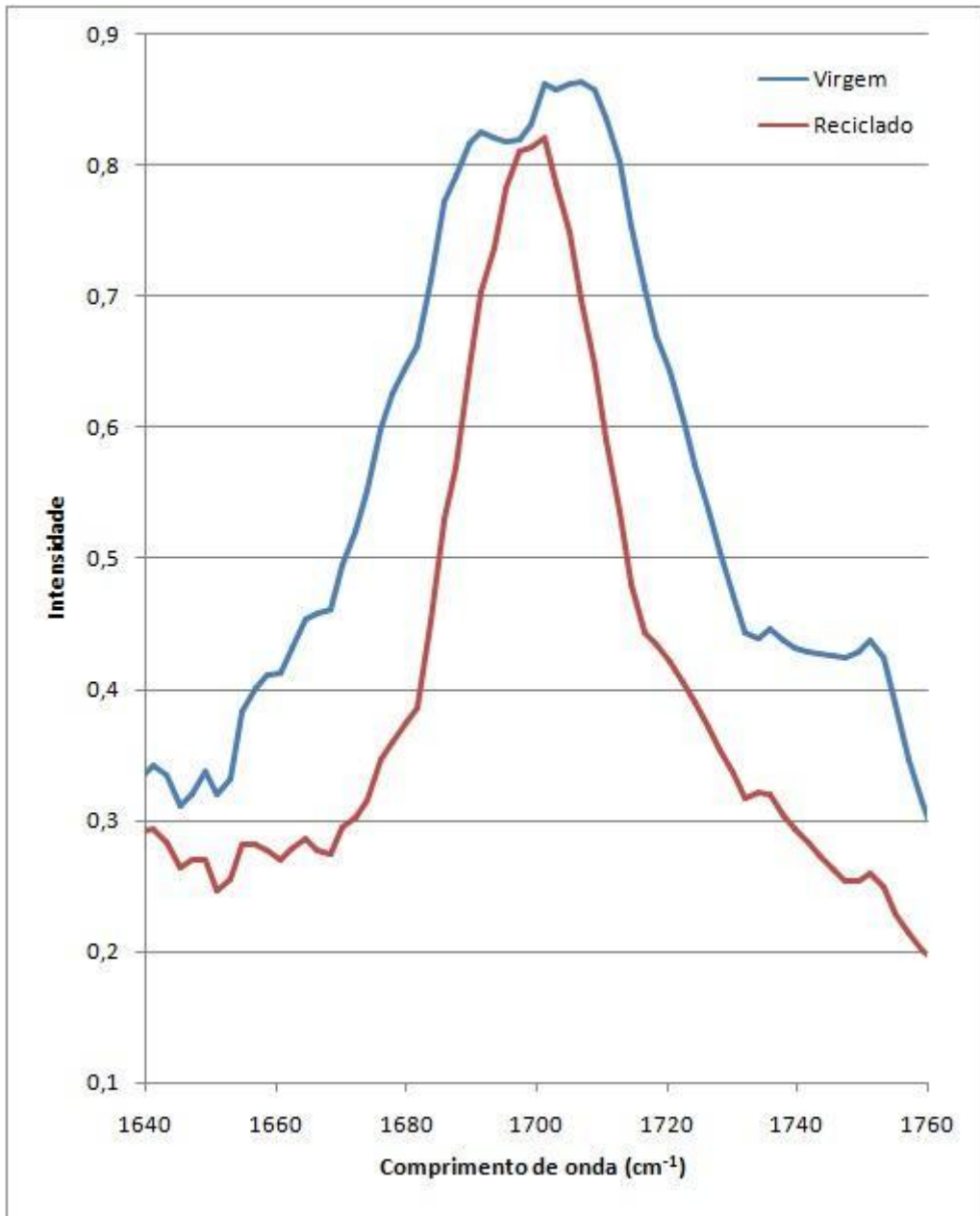
A Figura 5.25 mostra o resultado para o ensaio de infravermelho por reflectância para o polietileno virgem e para o polietileno reciclado e a Figura 5.26 mostra o detalhe do espectro.

Figura 5.25 – Espectro de infravermelho para polietileno virgem e para o polietileno reciclado feito por reflectância.



Fonte: a autora

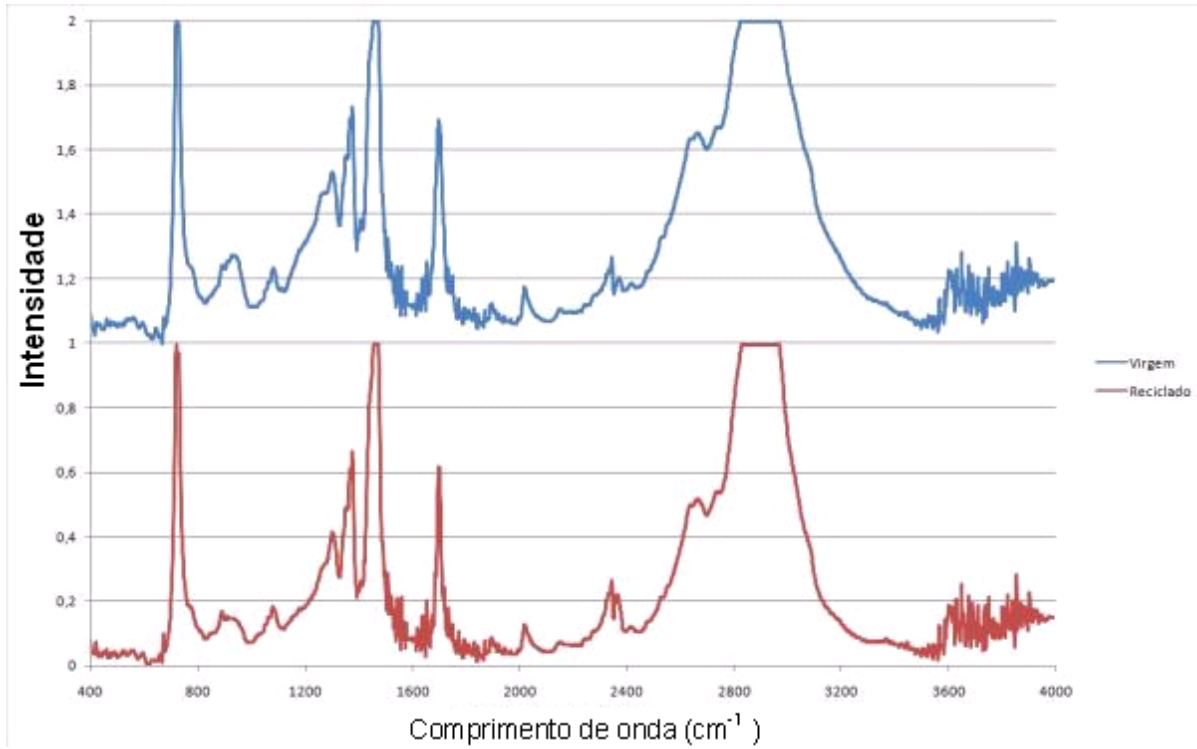
Figura 5.26 – Detalhe do espectro de infravermelho para polietileno virgem e para o polietileno reciclado feito por reflectância.



Fonte: a autora

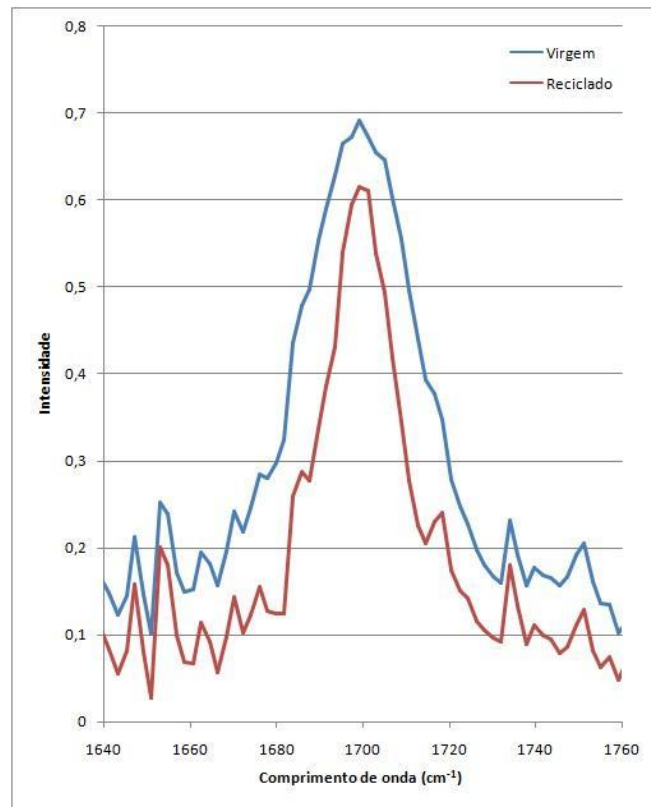
A Figura 5.27 mostra, nesta ordem, os espectros de infravermelho do polietileno virgem e do polietileno reciclado, realizados por transmitância e, o detalhe do espectro pode ser visto na Figura 5.28.

Figura 5.27 – Espectro de infravermelho para polietileno virgem e para polietileno reciclado feito por transmitância.



Fonte: a autora

Figura 5.28 – Detalhe do espectro de infravermelho para polietileno virgem e para o polietileno reciclado feito por transmitância.



Fonte: a autora

Os espectros de infravermelho são de grande importância para analisar os materiais de forma qualitativa. Neste caso, foi realizado para comparar duas amostras de polietileno, uma virgem e outra reciclada. A intenção desta análise foi verificar a possível degradação dos PEBD, tendo em vista que os compósitos foram preparados com polietileno reciclado oriundo de resíduo de processo de laminação das embalagens cartonadas. Embora não desejada, esta degradação, por promover a inserção de grupos polares nas cadeias do PEBD, poderia influenciar na polaridade do material, facilitando a relação deste com a fibra de papel, auxiliando na dispersão destas fibras na matriz de polietileno reciclado.

Comparando as curvas dos espectros, tanto por refletância quanto por transmitância é possível perceber poucas diferenças entre os polímeros virgem e reciclado. Isso demonstra que o processo de reciclagem pode ter favorecido a degradação do polietileno quando foi reciclado, mas não de forma significativa. Portanto, não se deve considerar significativa a criação pontos polares no polímero que pudessem auxiliar na dispersão das fibras nas composições que foram preparadas para este estudo.

6 CONCLUSÕES

A principal conclusão deste estudo é que a adição de fibras de celulose numa matriz de polietileno reciclado se mostrou positiva, melhorando algumas de suas propriedades mecânicas, mesmo não tendo sido utilizados aditivos para melhorar a adesão na interface polímero/fibra e empregando-se equipamentos comuns utilizados no processamento, facilmente encontrados em empresas de reciclagem.

Através dos ensaios mecânicos de flexão e tração foi possível comprovar o aumento na rigidez e da tensão de escoamento do polímero com a adição de fibras de celulose.

A degradação do PEBD utilizado oriundo de resíduo industrial não se mostrou significativa, a partir de análises de FTIR.

Em termos de caracterização térmica, realizada através do ensaio de DSC na Hot Stage, foi possível verificar que a presença de fibras de celulose não interferiu na temperatura de fusão do material e também não apresentou efeito nucleante, não alterando a temperatura de cristalização da matriz de PEBD.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Entre as sugestões para futuros trabalhos deve-se destacar:

- ✚ Aumentar as porcentagens de fibra de celulose na matriz de polietileno reciclado, visto que até a quantidade de 20% em massa, proposta neste estudo, as propriedades foram melhoradas;
- ✚ Preparar as fibras passando as mesmas em peneiras com mesh mais finas para favorecer a dispersão na matriz polimérica;
- ✚ Uso de equipamentos que proporcionem uma mistura mais homogênea dos componentes (polímero/fibra), como uma extrusora dupla rosca;
- ✚ Utilização de outros polímeros como matriz do compósito – polipropileno, por exemplo.

8 REFERÊNCIAS

- ABDELMOULEH, M. et al. Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading. **Composites Science and Technology**, 2007.
- AMBIENTE BRASIL. **Estatísticas de Reciclagem: Lixo**. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/estatisticas_de_reciclagem/estatisticas_de_reciclagem_-_lixo.html> Acesso em 12 abr 2013a.
- AMBIENTE BRASIL. **Polpa de papel moldado** <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/artigos/polpa_moldada.html> Acesso em 12 de abril de 2013b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 5033-90**. Standard Guide – The Development of Standards Relating to the Proper Use of Recycled Plastics. Designation, Philadelphia, 2000.
- ARACRUZ. **As fábricas**. Disponível em: <http://www.aracruz.com.br/show_prd.do?act=stcNews&menu=true&id=135&lastRoot=24&lang=1> Acesso em 21 ago. 11
- BARROS, J. **Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas**, Guimarães: Universidade do Minho, 2004.
- BRANDT, K., SCHUSTER, R.H., NUNES, R.C.R. Influence of Process Parameters on the Viscoelastic Behavior of NBR-Cell 2-Nanocomposite Mixtures. **Kautschuk Gummi Kunststoffe**, v.59, n.10, p.511-515, 2006.
- CALLISTER JR, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.
- CAMPOS, P. **Aproveitamento Industrial da Borracha Reciclada de Pneus Usados**. 2006. 141f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) – Escola de Engenharia da Universidade de Minho, Guimarães, 2006.
- CERQUEIRA, M. H. Placas y Tejas producidas a partir del reciclado del Polietileno y Aluminio presentes en los embalajes TETRAPAK. **Tecnología y Construcción**. v. 18-3, p.47-51, Caracas, 2002.
- CERQUEIRA, M. H. de. **Processamento do compósito LDPE/Al proveniente da reciclagem de embalagens cartonadas e desenvolvimento de suas modificações com fibras de madeira**. 2006. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

- COUTINHO, F. M. B., MELLO, I. L., SANTA MARIA, L. C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n.1, 2003. p. 1-13.
- CRUZ, J. S. Técnica NSM: uma nova abordagem no reforço de estruturas com materiais compósitos. **Inovação e Reabilitação**. Publindústria, 2008.
- EIRES, R., JALALI, S.; CAMÕES, A. Novos compósitos eco-eficientes para aplicações não estruturais na construção. In: CONGRESSO CONSTRUÇÃO. 3., 2007. **Anais...** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2007.
- FÁVARO, S. L. et al. Preparação de compósitos de polietileno pós-consumo com fibras de sisal e estudo de suas propriedades físico-químicas e morfológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABPol, 2006
- FELIPE, R. C. T. S. **Materiais Compostos**. Natal: Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte, 2008.
- FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. 2.ed. São Carlos:EdUFSCar, 2002. 285p.
- GACEVA, G.B. *et al.* Natural Fiber Eco-Composites. **Polymer Composites**. 2007.
- GALLON, A. V.; SALAMONI, F. L.; BEUREN, I. M. O processo de fabricação de papel reciclado e as ações associadas aos custos ambientais em indústria de Santa Catarina. **ABCustos Associação Brasileira de Custos**. v. 3, n. 1, jan/abr 2008.
- GAUTHIER, R. et al. Interfaces in Polyolefin/Cellulosic Fiber Composites: Chemical Coupling, Morphology, Correlation with Adhesion and Aging in Moisture. **Polymer Composites**, v. 19, n.3, 1998.
- GINDL, W., KECKES, J. All-cellulose nanocomposite. **Polymer**, v.46, n.23, p.10221-10225, 2005.
- GOMES, J. R. et all. Atrito e desgaste de compósitos carbono-carbono em deslizamento como pares dissemelhantes. In: CONGRESSO IBÉRICO DE TRIBOLOGIA, n. 2, 2003. **Anais...** Valência, 2003. p. 227-234.
- HABIBI, Y. et al Processing and characterization of reinforcement polyethylene composites made with lignocellulosic fibers from Egyptian agro-industrial residues. **Composites Science and Technologic**, p. 1877-1885, Science Direct: 2008.

- HAHN A. F.; CAVALHEIRO, A. Z.; SANTANA, F. E. Projeto Conceitual de um Desagregador para Reciclagem de Papel. **Caderno de Publicações Acadêmicas**. Araranguá: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IF-SC, 2010.
- HULL, D. **An introduction to composite materials**. Cambridge: Ed. Cambridge University Press, 1988, 246p
- JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate polymers**. p. 343-364. Science Direct: 2008.
- JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Fibras Curtas de Sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 136-141, out./dez. 1999.
- KAPLAN, D.I. **Biopolymers from Renewable Resources**, Springer Verlag: 1998, p.47-61.
- KARLSSON, J. O. et al, Improvement of Adhesion Between Polyethylene and Regenerated Cellulose Fibers by Surface Fibrillation. **Polymer Composites**, v. 17, n.2, 1996.
- KLABIN. **Produtos** <http://www.klabin.com.br/pt-br/produtos/linha.aspx?idLinha=6>
Acesso em 23 de agosto de 2011.
- LAPA, V. L. da C. **Desenvolvimento e avaliação de nanocompósitos NBR-celulose II**. 2007. 176F. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros); Universidade Federal do Rio de Janeiro; Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Rio de Janeiro, 2007.
- LIMA, A.F. et al.. In: D'ALMEIDA, M;L.O. **Celulose e Papel – Tecnologia de fabricação de pasta celulósica**. 2.ed. São Paulo:IPT/SENAI , 1988.
- LOPES, C. M. A.; FELISBERTI, M. I. Composite of Low-Density Polyethylene and Aluminum Obtained from the Recycling of Postconsumer Aseptic Packaging. **Recycling of Postconsumer aseptic packaging**. Wiley InterScience, 2006.
- LUZ, S. M. DA; GONÇALVES, A. R.; DEL'ARCO JR, A. P. Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno Reforçado com Celulose de Bagaço e Palha de Cana. **Revista Matéria**, v. 11, n. 2, p. 101–110, 2006.
- MACIEL, A. da. S. **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de *Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis*, em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato**. 2001. 121f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

- MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduíches** – Barueri, Manoele, 2005.
- MITRA, S.B.; HOLMES, An application of nanotechnology in advanced dental materials. **J Am Dent Assoc**; v. 10, p. 1382-1390, 2003
- MOURAD, A. L. O significado da medida de rigidez do cartão. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens**. v. 16, n. 1, Instituto de Tecnologia de Alimentos, jan./fev./mar. 2004.
- MULARINI, D.R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. 2009, 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
- NEVES, F. L. **Efeito da interação entre fibras virgens e recicladas nas características físicas de cartões multifolhados**. 2000, 73f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2000.
- NEVES, F.L.; VON ZUBEN, F.J. Recycling of Aluminum and Polyethylene from TETRAPAK Carton Packages as Plastic Composite. In: GLOBAL PASTICS ENVIRONMENTAL COUNCIL – Feb, 2003, Detroit. **Proceeding Book**. Detroit, 2003.
- NEVES, F. L. Novos Desenvolvimentos para Reciclagem de embalagens longa vida. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 37., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004.
- NEVES, F. L. **Eletrodissolução de alumínio em polpa celulósica proveniente da reciclagem de embalagens cartonadas multicamadas**. 2009, 109f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2009.
- OLIVEIRA, J. F. de S. **Estudos da influência da configuração em compósitos poliméricos híbridos**. 2007. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- PADILHA, A.F.. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. Curitiba, MTC Produções Gráficas, 2000. 349p.
- PASQUINI, D. et al. Surface esterification of cellulose fibres: Processing and characterisation of low-density polyethylene/cellulose fibres composites. **Composites Science and Technology**. 2008.

- PAULESKI, D. T. **Características de compósitos manufacturados com polietileno de alta densidade (PEAD) e diferentes proporções de casca de arroz e partículas de madeira.** 2005. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.
- POURBOGHRAT, F.; MISRA, M. Renewable Resource-Based Green Composites from Recycled Cellulose Fiber and Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Bioplastic. **Biomacromolecules**, 2006.
- RAZZOLINI, F.C. **Técnicas de Fabricação de papéis e cartões para embalagens.** São Paulo: Associação brasileira técnica de celulose e papel, 1994.
- RIBEIRO et al, 2012. **Compósitos reforçados com partículas e compósitos reforçados com fibras.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.
- REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O; Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, 2000.
- ROWELL, R. M. et al. Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and oportunities, In: **LIGNOCELLULOSIC** - Plastics Composites. São Paulo: USP/UNESP, p. 23-51, 1997
- SANTOS, A. S. F.; AGNELLI, J. A. M.; MANRICH, S. - Tendências e Desafios da Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 5, p. 307 - 312, 2004.
- SANTOS, C. P. *et al.* Papel: como se fabrica? **Química nova na escola**. n. 14, nov. 2001
- SANTOS, L. R. N. dos. **Avaliação da Eficiência da Separação de Plásticos de Resíduos Sólidos Urbanos por Métodos de Dissolução Selectiva.** 2009. 132f. Dissertação (Mestrado em Processamento e Caracterização de Materiais). Universidade do Minho - Escola de Engenharia, Guimarães, 2009.
- SCHNEIDER, L. K. A.; JACOBI, M. A. M. Estudo do uso de pó de borracha de pneu em misturas termoplásticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, n. 8, 2005, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: ABPol, 2005. 1 CD-ROM.
- SILVA, A. H. de A. **Avaliação do efeito de seis meses de armazenamento em água na superfície de compósitos do tipo nanohíbrido, nanoparticulado e híbrido.** 2010. 62f. Monografia (Graduação em Odontologia). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

- SILVA, B. B. **Rotomoldagem de blendas de polietileno reciclado e de blendas de polietileno reciclado/fibra de açaí.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.
- SILVA, J. D. C. B. di K. F. da; **Avaliação de Propriedades de Artefatos à base de Borracha Natural.** 2007. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SILVA, P. da et al. Propriedades mecânicas e térmicas de misturas à base de polipropileno e de pneu regenerado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, n. 8, 2005, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: ABPol, 2005. 1 CD-ROM.
- SOARES, E. P. *et al.* Caracterização de Polímeros e Determinação de Constituintes Inorgânicos em Embalagens Plásticas Metalizadas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 3, p. 206 - 212, 2002.
- SOBRINHO, L. L. **Desenvolvimento de Matriz Polimérica de Material Compósito para Reforço de Dutos de Aço.** 2005. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.
- SPINACÉ, M. A. da S.; PAOLI, M. A. D. A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65 – 72, 2005.
- TETRA PAK. **História.** Disponível em: <http://www.tetrapak.com.br/sobre/historia/index_historia.asp>. Acesso em: 14 de junho de 2009a.
- TETRA PAK. **Embalagens cartonadas.** Disponível em: <<http://www.tetrapak.com.br/negocios/embalagens/familias.asp>>. Acesso em: 19 de abril de 2009b.
- TETRA PAK. **Cultura ambiental nas escolas:** fotos. Disponível em: <<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/multimedia/fotos#/multimedia/fotos/produtos>> Acesso em 21 ago 2011a.
- TETRA PAK. **Reciclagem.** Disponível em: <http://www.tetrapak.com/br/reciclagem/ciclo_de_vida_da_embalagem/pages/reciclagem.aspx>. Acesso em 21 ago 2011b
- TITA, S. P. S., PAIVA, J. M. F., FROLLINI, E. Resistência ao Impacto e Outras Propriedades de Compósitos Lignocelulósicos: Matriz Termofixas Fenólicas Reforçadas com Fibras de Bagaço-de-açúcar. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.12, p.228-239, 2002.

- TORRES, D.E. **Desenvolvimento de um eco-compósito moldado composto de fibras recicladas celulósicas e termoplásticas** 2009. 133f. Dissertação (Mestrado em Desing e Market). Universidade do Minho Escola de Engenharia, Guimarães, 2009
- VIEIRA, R. M. M. V. **Estudo da eficiência e durabilidade de diversos métodos de fixação de produtos antimicrobianos em fibras celulósicas**. 2006; 128; Dissertação (Mestrado em Química Textil); Universidade do Minho Escola de Engenharia, Guimarães, 2006.
- VON ZUBEN, F. The Thermal Plasma Technology Separates Aluminum from Plastics in Packages. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY, ENVIRONMENTAL AND DISASTERS, 2005, Charlotte, **Proceeding Books**. Charlotte, 2005.