

**CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE  
TECIDO DE JUTA REFORÇANDO MATRIZ DE POLIETILENO  
RECICLADO**

**AMANDA CAMERINI LIMA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE– UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO DE 2009

# **CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE TECIDO DE JUTA REFORÇANDO MATRIZ DE POLIETILENO RECICLADO**

**AMANDA CAMERINI LIMA**

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

Orientador: Prof. Sergio Neves Monteiro

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**AGOSTO - 2009**

# **CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE TECIDO DE JUTA REFORÇANDO MATRIZ DE POLIETILENO RECICLADO**

**AMANDA CAMERINI LIMA**

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

Aprovada em 5 de agosto de 2009

Comissão Examinadora:

---

Prof. Lucio José Terra Petrucci (Doutor) – Escola Técnica de Cerâmica de Campos - FAETEC

---

Prof. Luis Augusto Hernández Terrones (Doutor) - UENF

---

Prof. Ruben Jesús Sanchez Rodriguez (Doutor) - UENF

---

Prof. Sergio Neves Monteiro (Phd) - UENF

Orientador

## DEDICATÓRIA

***“À minha família, aos meus amigos e  
ao meu namorado Pietro.”***

## SUMÁRIO

Índice de figuras	III
Índice de tabelas	V
Resumo	VII
Abstract	VIII
Justificativas	IX
Objetivos	X
Capítulo 1 – Introdução	11
Capítulo 2 – Revisão bibliográfica	13
2.1 Materiais compósitos – considerações gerais	13
2.1.1 Importância evolução dos compósitos	13
2.1.2 Definição, classificação e características	15
2.1.3 Compósitos de matriz polimérica	19
2.1.4 Matriz de polímero reciclado	22
2.1.5 Tipos e propriedades dos polietilenos	24
2.2 Fibras vegetais	26
2.2.1 Classificação e propriedades das fibras vegetais	29
2.2.2 fibras vegetais de emprego prático e interesse para compósitos	33
2.2.3 As fibras de juta	35
2.3 Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais	38
2.4 Compósitos poliméricos reforçados com juta	39
2.4.1 Fratura em compósitos reforçados com fibras	41
2.5 Compósitos reforçados com tecido de juta	42
2.6 Teoria do desempenho mecânico de tecidos com danos	45
2.7 Estudo comparativo do uso de tecido de juta reforçando outras matrizes poliméricas	47
2.8 Observações complementares	48
	50
Capítulo 3 - Materiais e métodos	
3.1 Materiais utilizados	50
3.1.1 Polietileno	50
3.1.2 Tecido de juta	50
3.2 Preparação dos corpos de prova	51
3.3 Ensaio mecânicos	53
3.3.1 Ensaio de flexão de três pontos	53
3.3.2 Ensaio de tração	54

3.3.3 Ensaio de impacto	54
3.3.3.1 Ensaio de impacto charpy	54
3.3.3.2 Ensaio de impacto izod	55
3.4 Caracterização morfológica	56
3.5 Ensaio térmicos	57
3.5.1 Ensaio de DMA (dynamical mechanical analysis)	57
Capítulo 4 - Resultados e discussões	59
4.1 caracterização do material utilizado como reforço dos compósitos – tecido de juta.	59
4.1.1 Ensaio de tração de tecido, fio e fibra de juta novo e usado	59
4.1.2 Características de fratura de tecido de juta novo e usado: estudo do dano	62
4.1.2.1 Modelamento mecânico de danos em tecidos	62
4.2 Caracterização do material utilizado como matriz dos compósitos – polietileno reciclado	65
4.3 Caracterização mecânica de compósitos com matriz de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo e usado	66
4.3.1 Ensaio de impacto	66
4.3.1.1 Ensaio de impacto charpy	66
4.3.1.1.1 Polietileno reciclado / tecido de juta novo	66
4.3.1.2 Ensaio de impacto izod	68
4.3.1.2.1 Polietileno reciclado / tecido de juta novo	68
4.3.1.2.2 Polietileno reciclado / tecido de juta usado	70
4.3.2 Ensaio de flexão em três pontos	71
4.3.2.1 Comparação entre a resistência à flexão de compósitos com matriz de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo e usado	71
4.4 Caracterização térmica	75
4.4.1 DMA (análise dinâmico mecânica)	76
4.5 Análise estrutural por microscopia eletrônica de varredura (mev)	81
4.5.1 Caracterização estrutural de fibras e fios	81
4.5.2 Fratura dos ensaios de tração	82
4.5.3 Fratura dos ensaios de impacto	84
4.5.4 Ensaio de flexão	88
4.6 Comparação com materiais convencionais	90
Capítulo 5 Conclusões	92
Capítulo 6 Referências bibliográficas	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos materiais de engenharia	13
Figura 2: Organograma de classificação dos materiais compósitos	17
Figura 3: Constituição estrutural de uma fibra vegetal.	31
Figura 4: Estrutura da celobiose, estrutura repetitiva da celulose	32
Figura 5: Fibras na etapa de secagem e planta de juta	37
Figura 6: Aumento do módulo de Young em função do aumento da fração volumétrica de fibras	40
Figura 7: Mecanismos e falhas em materiais compósitos	41
Figura 8: Gráfico tensão deformação da fibra e do tecido de juta	43
Figura 9: Gráfico tensão-deformação de um compósito polimérico com matriz de poliéster reforçado com tecido de juta e da resina pura	44
Figura 10: Tecido híbrido de algodão e juta	45
Figura 11: Desenho esquemático da ruptura em linha horizontal de fios (a), causando danos ao longo do eixo vertical (b)	46
Figura 12: Simulação teórica do dano correspondente à figura 6, de acordo com o modelo de Godfrey e Rossetos	46
Figura 13. Polietileno reciclado utilizado como matriz dos compósitos produzidos neste trabalho	50
Figura 14. Saco de aniagem descartado por supermercado cujo tecido será utilizado como reforço de compósitos	51
Figura 15. Tecido de juta novo disponível no mercado	51
Figura 16: Matriz ou molde utilizado na confecção dos compósitos deste trabalho	52
Figura 17: Forno e prensa utilizados na confecção dos compósitos	52
Figura 18: Aspecto do compósito após o processamento	53
Figura 19: Pêndulo utilizado para ensaios de impacto Charpy	55
Figura 20: Pêndulo utilizado para ensaio de impacto Izod	56
Figura 21: Microscópios eletrônicos de varredura utilizados para análises neste trabalho (a) Jeol JSM 640 (b) Shimadzu SSX 550	57
Figura 22: Equipamento da TA instruments utilizado nos ensaios de DMA	58
Figura 23: Exemplos de fios trançados de sacos de aniagem de juta (a) novos e (b) descartados	59
Figura 24: Variação da resistência à tração dos tecidos com a deformação total	61
Figura 25: Variação da resistência à tração com a deformação total: (a) fios e (b) fibras	61
Figura 26: Parte dos sacos de juta com respectivas tramas: (a) novo; (b) usado	63
Figura 27: Amostras de tecidos novos (a) e usados (b) com danos associados na trama	64
Figura 28: Energia de impacto Charpy em função da fração em peso de tecido de juta novo	67
Figura 29: Aspecto dos corpos de prova rompidos por impacto Charpy	68
Figura 30: Energia de impacto Izod em função da fração em peso de tecido	69

de juta novo	
Figura 31: Aspecto dos corpos de prova rompidos por impacto Izod	69
Figura 32: Energia de impacto Izod em função da fração em peso de tecido de juta usado	70
Figura 33: Curvas de carga vs. extensão para compósitos com diferentes frações em peso de tecido de juta	71
Figura 34: Variação da resistência à flexão do compósito em função da fração em peso de tecido de juta	73
Figura 35: Comparação do módulo de flexão de compósitos de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo e usado	75
Figura 36: Curvas de DMA mostrando a variação dos parâmetros dinâmico-mecânicos com a temperatura para compósitos com (a) 0, (b) 10, (c) 20 e (d) 30% em peso de tecido de juta	77
Figura 37: Curvas de DMA da variação do módulo de armazenamento, $E'$ , com a temperatura para compósitos de polietileno reciclado incorporado com diferentes frações de tecido usado de juta bem como para o polietileno reciclado sem incorporação, 0%.	78
Figura 38: Curvas de DMA da variação do módulo de perda, $E''$ , com a temperatura para compósitos de polietileno reciclado incorporado com diferentes frações de tecido usado de juta bem como para o polietileno reciclado sem incorporação.	79
Figura 39: Curvas de DMA da variação da tangente $\delta$ com a temperatura para compósitos de polietileno reciclado incorporado com diferentes frações de tecido de juta bem como para o polietileno reciclado sem incorporação	80
Figura 40: Micrografia por MEV de feixes de fibras: (a) novas e (b) descartadas	81
Figura 41: Micrografia por MEV de fios formados por fibras entrelaçadas: (a) novos (b) descartados	82
Figura 42: Fratura de uma fibra de juta nova.	83
Figura 43: Fratura de uma fibra de juta usada.	83
Figura 44: Fratura de um fio de juta novo	84
Figura 45: Fratura de um fio de juta usado	84
Figura 46: Micrografia da superfície de fratura de um corpo de prova com 0% de tecido de juta novo	85
Figura 47: Micrografia da superfície de fratura de um corpo de prova testado em impacto charpy com 30% (a) e 40% (b) de tecido de juta novo.	85
Figura 48: Micrografias da região de fratura de corpos de prova de polietileno reciclado puro (0% de tecido de juta). (a) região do entalhe, (b) superfície de fratura.	86



Figura 49: Micrografia da superfície de fratura de um corpo de prova com 10% (a) e 30% (b) de tecido de juta novo.	87
Figura 50: Micrografias da superfície de fratura de um corpo de prova com 10% (a) e 30% (b) de tecido de juta usado.	87
Figura 51: Micrografia por MEV das fibras trançadas de juta formando os fios do tecido.	88
Figura 52: Micrografia por MEV da superfície de uma partícula de polietileno reciclado.	88
Figura 53: Micrografias da superfície de fratura de corpos de prova ensaiados em flexão: (a) polietileno puro; (b) compósito com 30% de tecido de juta	89
Figura 54: Detalhes de fibras do tecido de juta inseridas na matriz de polietileno	89

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Breve histórico de fibras de alto desempenho	15
Tabela 2: Comparação das faixas típicas das propriedades das resinas	20
Tabela 3: Propriedades do polietileno de baixa densidade	26
Tabela 4: Propriedades mecânicas e características das fibras vegetais e fibras convencionais utilizadas como reforço	30
Tabela 5: Composição química provável de algumas fibras vegetais (% em peso)	32
Tabela 6. Propriedades mecânicas da fibra de juta	39
Tabela 7: Efeito do aumento da fração volumétrica de fibra de juta nas propriedades mecânicas	41
Tabela 8: Resistência à tração e deformação máxima dos tecidos, fios e fibras de sacos de aniagem de juta.	60
Tabela 9: Parâmetros dos tecidos de juta	64
Tabela 10: Resistência a flexão e módulo de flexão de compósitos de matriz de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo e usado	74
Tabela 11: Resistência à flexão de compósitos de juta e de outros materiais convencionais.	90
Tabela 12: Preço para comercialização dos compósitos juntamente com o preço de venda (2009) de outros materiais	91

## RESUMO

### COMPÓSITOS DE TECIDO DE JUTA REFORÇANDO MATRIZ DE POLIETILENO RECICLADO

A juta (*corchorus capsularis*) vem sendo extensivamente utilizada na forma de fibras para usos tradicionais como vestuário, acessórios e tapeçaria por nossa sociedade. Investigações também estão sendo conduzidas para aplicar as boas propriedades mecânicas da fibra de juta em materiais compósitos, em particular seu uso como tecido com malha trançada para reforçar compósitos de matriz polimérica ambientalmente corretos. Este reforço natural de tecido de juta seria um possível substituto para reforços à base de fibras sintéticas. Além disso, estes compósitos podem tornar-se sucedâneos de materiais convencionais para painéis de construção e mobiliário. O presente trabalho avalia propriedades de compósitos formados por tecido de juta em matriz de polietileno reciclado através de propriedades mecânicas, morfologia e análise térmica. Constatou-se que o aumento da porcentagem em peso de tecido de juta como reforço de compósitos de matriz de polietileno reciclado melhora suas propriedades mecânicas de flexão até 30 % em peso de tecido e que a energia de impacto Izod e Charpy também são elevadas com o aumento do tecido de juta como reforço do compósito. Com a avaliação das propriedades térmicas foi observado que o polietileno reciclado puro apresentou um menor valor de temperatura de transição vítrea e que esta temperatura aumenta ligeiramente com a incorporação de tecido de juta na matriz. Além disto, o módulo de armazenamento da matriz pura é levemente menor do que o dos compósitos. Foi concluído, a partir dos resultados obtidos, que compósitos de tecido de juta tanto novos quanto usados constituem um bom substituto para materiais sintéticos, além de contribuir para o meio ambiente utilizando materiais, o tecido usado e o polietileno reciclado, que seriam descartados ou oriundos de reciclagem.

## **ABSTRACT**

### **JUTE FABRIC COMPOSITES STRENGTHENED MATRIX OF RECYCLED POLYETHYLENE**

The jute (*Corchorus capsularis*) has been extensively used as fibers for traditional applications such as clothing, accessories and upholstery in our society. Investigations are also being conducted to apply the superior mechanical properties of jute fibers in composites materials, particularly their use as weaved fabric to strengthen polymer-matrix composites. This natural reinforcement caused by the jute fabric environmentally correct can be a possible substitute for reinforcements synthetic fibers. Moreover these natural composites may become alternatives for conventional materials for construction panels and furniture. This study evaluates the properties of composites made of jute fabric in recycled polyethylene matrix by means of their mechanical properties, morphology and thermal analysis. It was found that increasing the percentage by weight of jute fabric as reinforcement in composites with recycled polyethylene matrix, their flexural mechanical properties are also increased up to 30% weight of fabric. The impact energy, measured by Charpy and Izod are also increased with the increase of jute fabric as reinforcement. With the evaluation of thermal properties it was observed that the pure recycled polyethylene showed a lower value of glass transition temperature and that this temperature increases slightly with the incorporation of jute fabric in the matrix. In addition, the storage modulus of the pure matrix is slightly lower than that of the composites. It was concluded from the results obtained, that both, the new and used are possible alternatives for synthetic materials. Furthermore, these composites help the environment since they use materials used jute fabric and recycled polyethylene that were discarded or originates from recycling.

## JUSTIFICATIVAS

**Sob o ponto de vista ambiental:** O aproveitamento de uma fibra 100% natural e que não polui o meio ambiente como substituta de fibras sintéticas e o uso do polietileno reciclado como matriz dos compósitos faz com que esse material seja “ambientalmente amigável”. A procura por materiais renováveis tem aumentado a cada dia. Esta procura está relacionada à limitação de recursos naturais e aos esforços para diminuir a carga de CO<sub>2</sub> lançada do meio ambiente. Por isso matérias primas de origem renovável apontam como uma das alternativas para a produção de materiais ambientalmente corretos, em consequência do acúmulo nos descartes de materiais que não são biodegradáveis, os quais tendem a aumentar com o crescimento populacional dos centros urbanos.

**Sob o ponto de vista técnico:** O desenvolvimento de um substituto alternativo e de alta qualidade para área de mobiliários e que já vem sendo utilizado na indústria automobilística, com grandes vantagens.

**Sob o ponto de vista econômico:** A possibilidade de se desenvolver materiais de custo menor com boas características de acordo com as necessidades de utilização.

**Sob o ponto de vista científico:** A obtenção de um material com boas propriedades mecânicas e o aproveitamento de materiais que seriam jogados no ambiente prejudicando a saúde da população.

## OBJETIVOS

- Produzir amostras de compósitos, com matriz de polietileno reciclado, reforçados com tecido de juta descartado e novo, estabelecendo uma proporção polietileno/tecido de juta de forma a se otimizar as propriedades mecânicas;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados.
- Caracterizar termicamente os compósitos fabricados;
- Caracterizar morfológicamente os compósitos observando a aderência entre fibra/matriz.
- Comparar os compósitos de tecido de juta com materiais empregados na construção civil e mobiliário.

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Fibras vegetais lignocelulósicas são tradicionalmente utilizadas para a produção de fios, cordas, sacarias, mantas, tapetes, artefatos de decoração, etc. (Cruz-Ramos, 1986). Existe um crescente interesse em encontrar novas aplicações para este abundante e renovável recurso natural. Os materiais compósitos aparecem como uma importante classe para a utilização destas fibras como reforço em matrizes poliméricas termorrígidas ou termoplásticas, em substituição às fibras sintéticas (Young, 1997). Na realidade, fibras sintéticas de carbono, vidro e aramida, apesar de possuírem boas propriedades mecânicas, apresentam custo elevado, não são biodegradáveis e, em alguns casos, podem comprometer a saúde humana (Araújo e Mothé, 1998).

O desenvolvimento de materiais corretos de maneira ecológica e a melhor adequação dos processos têm sido relevantes fatores para minimizar os problemas ambientais no mundo. As fibras naturais apresentam um grande potencial de aplicação na indústria automobilística, na área de revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões e construção civil e mobiliário. As perspectivas futuras para as fibras naturais são muito boas também em outras áreas, como por exemplo, a indústria têxtil, atualmente com o seu mercado em expansão (Morassi, 1994)

Inúmeras fibras naturais tradicionalmente empregadas em tecelagem sacaria e cordaria apresentam um potencial de utilização como reforço em compósitos, tais como a fibra de juta (d'Almeida, 1987, Mohanty e Misra, 1995); sisal (Chand e Hashim, 1993), bananeira (Zhu et al, 1995).

Dentre estas fibras naturais com potencial de aplicação, a que merece maior destaque é a **juta** (*Corchorus capsularis L.*), planta da família das *Tiláceas*. Esta fibra é uma das mais utilizadas na fabricação de diversos produtos (Cabral et al 2005; Dotan et al 1989). A juta é uma fibra longa 100% natural, macia e brilhante, sendo uma das mais resistentes, perdendo para o algodão em produção e variedade de uso.

A utilização de resíduos destas fibras ou seus tecidos como reforço de plásticos reciclados representaria uma forma de evitar a poluição ambiental através do reaproveitamento de materiais já usados.

Em todo o mundo a reciclagem de plásticos é uma prática corrente que oferece ganhos à população de baixa renda e evita o acúmulo de lixos contribuindo

com o meio ambiente. Dentre esses plásticos reciclados, os mais facilmente encontrados e com menor preço de venda são os polietilenos, tornando-os viáveis para a fabricação de compósitos ambientalmente corretos e de baixo custo (Petrucci, 2004).

A possibilidade de se reforçar o polietileno reciclado com tecido de juta gera um tipo de compósito que muito bem se enquadra como um material ambientalmente correto. Por outro lado, para competir com outros materiais, este compósito deve ter suas principais propriedades mecânicas devidamente avaliadas.

Assim esta tese realizou um levantamento sistemático da possibilidade de utilização de tecidos fritos com fibra de juta para servirem de reforço em compósitos de matriz de polietileno reciclado. Os tecidos foram extraídos de sacos de aniagem tanto novos quanto usados, o que então caracteriza um compósito ambientalmente correto. Como complemento aos resultados obtidos foi realizada uma avaliação de custo benefício dos compósitos investigados, comparativamente com os materiais convencionais que poderiam ser substituídos na construção civil e indústrias de mobiliário de madeira.



## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - MATERIAIS COMPÓSITOS – CONSIDERAÇÕES GERAIS

#### 2.1.1 – IMPORTÂNCIA EVOLUÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para se ter uma idéia geral sobre a importância dos materiais compósitos vale lembrar que atualmente existem patenteados mais de 50 mil diferentes materiais de engenharia dentre os quais os projetistas podem selecionar aqueles que atendam aos requisitos desejáveis para um projeto. Estes materiais de engenharia podem ser classificados em compósitos, polímeros cerâmicos e metais como mostrado na figura 1.

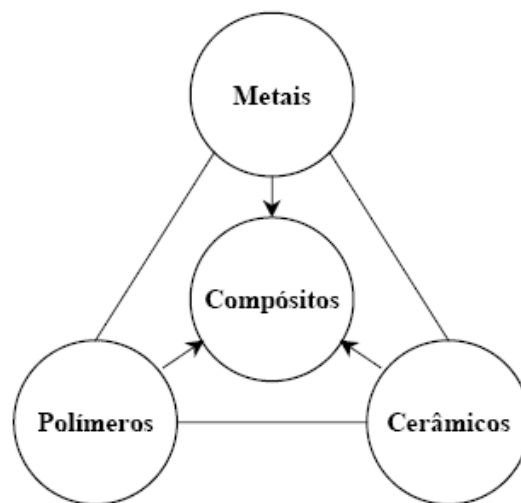


Figura 1: Classificação dos materiais de engenharia. Adaptado de Beaumont, 1989.

Destas classes, a dos compósitos é a que tem maior potencial de crescimento já que combina a possibilidade de associar materiais de outras classes.

Na verdade, a evolução da humanidade sempre esteve associada ao uso de materiais para atingir níveis de desenvolvimentos cada vez maiores e mais complexos. Desde a idade da pedra, que é um material cerâmico, os seres humanos aperfeiçoaram técnicas de lascas e polimento que ajudaram a melhorar as condições de vida e consolidar as primeiras formas de civilização. Há centenas de milhares de anos, o *homo erectus*, nosso ancestral, além das pedras também utilizava madeira e palha que são todos materiais poliméricos, para a construção, e provavelmente também usava pequenos meteoritos (materiais metálicos), encontrados por acaso como adornos para colares ou pontas de ferramentas. Em algum momento dos primórdios da pré-história nossos antepassados misturavam barro com palha para fazer blocos de adobe, talvez o primeiro material compósito,

visando reforçar muros e paredes de suas construções.

Nossa civilização evoluiu com a incorporação de um número crescente de materiais passando daqueles coletados diretamente da natureza para a idade dos metais, como o ferro e o bronze, transformados de minerais com o auxílio do fogo. Com materiais cada vez mais resistentes e sofisticados ampliou-se, há algumas dezenas de milhares de anos, o domínio do *homo sapiens*, sobre a natureza. Isto elevou continuamente o padrão de vida da humanidade passando por diversas etapas de desenvolvimento sempre com uma explícita correlação com as classes de materiais como indicado na figura 1.

Segundo Beaumont, (1989), observa-se que dentre as diversas maneiras de avaliação do padrão de vida de um país ou sociedade, o consumo de materiais de engenharia por indivíduo, disponíveis na forma de bens e serviços, pode ser uma das mais explícitas. Os bens manufaturados quer sejam para consumo ou produção, são obtidos por meio da conversão de materiais de engenharia, adicionando-lhes um valor. A história tem demonstrado que quanto mais eficiente o sistemas de produção é capaz de realizar esta conversão, melhor será o padrão de vida da sociedade. Este padrão até por volta de 2000 a.C., foi presumivelmente determinado pelo uso de ferramenta de corte. Em torno de 1500 a.C., a tonelagem do bronze, provavelmente, revelou quem eram, então, as potências mundiais. Na era recente, a partir de 1850, teriam sido o aço, seguido, no século XX, pelas ligas leves (no projeto de aviões) e as superligas (para motores a jato) os materiais cujo consumo indicou países como Inglaterra, EUA, Rússia, Japão e Alemanha como, então, os mais modernos.

Os materiais compósitos atualmente são os que melhor servem como indicador para o desenvolvimento e avaliação do padrão de vida da sociedade.

Uma série de experiências na Inglaterra levou a descoberta, em meados de 1964, das fibras leves de carbono de alta resistência e grande rigidez. Estava iniciando uma era de compósitos avançados com matrizes reforçadas com essas fibras. Nas duas décadas seguintes a produção de materiais compósitos reforçados com fibras havia crescido a uma taxa que perdia apenas para o aço até seu apogeu. Sem dúvida hoje em dia presencia-se, com os compósitos avançados, uma revolução dos materiais de engenharia. Desde o início o grande estímulo para a produção dos materiais compósitos reforçados com fibras estava relacionado à características de combinar alta resistência e ou rigidez com baixo peso específico, o

que conferia grande eficiência estrutural.

A evolução dos materiais compósitos na tabela 1 ilustra algumas das etapas no desenvolvimento desta classe e mostra também que atualmente existe maior variedade de fibras disponíveis

Tabela 1. Breve histórico de fibras de alto desempenho (Beaumont, 1989).

FIBRAS MAIS RECENTEMENTE UTILIZADAS	
Alumina ( $Al_2O_3$ );	Diboreto de Titânio;
Carboneto de silicone (SiC);	Sílica;
Alumina-boro-sílica;	Quartzo;
Nitreto de boro;	Aramida.

### 2.1.2 – DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Muitas de nossas tecnologias modernas exigem materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas unicamente pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. Isso é especialmente verdadeiro para materiais necessários em aplicações aeroespaciais, subaquáticas e de transporte. (Callister, 2002).

As combinações e as faixas das propriedades dos materiais usados em engenharia estão sendo ampliadas através do desenvolvimento de materiais compósitos. De uma maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material multifásico, especialmente fabricado, isto é, “engenheirado”, que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem. Este processo de “engenheirar” o compósito permite que seja obtida uma melhor combinação de propriedades. De acordo com esse **princípio da ação combinada**, melhores propriedades são criadas através da associação de dois ou mais materiais distintos (Callister, 2002 , Chawla 1993, Strong 1989, Hull e Clyne 1996).

Os materiais compósitos têm sua origem na própria natureza. A madeira, por exemplo, é constituída por fortes e flexíveis fibras de celulose ligadas por um polímero natural chamado de lignina e o osso humano é um composto natural de hidróxi-apatita impregnada por colágeno (Wilbeck e Haroda, 2005). Entretanto esses materiais naturalmente conjugados não podem ter suas propriedades alteradas propositadamente por mudanças na quantidade relativa, no tamanho, na morfologia ou na distribuição de suas fases.

Por outro lado, algumas propriedades podem ser projetadas e melhoradas com a fabricação de um material compósito sintético como a resistência mecânica, resistência à corrosão, rigidez, desgaste peso, muitas outras (Jones, 1999). Assim ficará aqui entendido que os materiais compósitos são aqueles sinteticamente obtidos (engenheirados) pela combinação de diferentes fases, estas podendo ser também sintéticas ou até mesmo naturais, como as fibras lignocelulósicas.

Materiais compósitos são genericamente constituídos por dois tipos de fases; uma é chamada **matriz**, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase **dispersa**. As propriedades dos compósitos são condicionadas pelas propriedades das fases constituintes. Em muitos casos a fase dispersa pode agir como um reforço para a matriz. Além da matriz e da fase dispersa, a interface entre elas também tem papel relevante no desempenho do compósito.

A região interfacial, fase dispersa/matriz, é de fundamental importância na determinação das propriedades dos compósitos, pois é através da interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço. A interface representa a região do espaço onde duas fases se interagem. Seu comportamento e propriedades são determinantes para uma série de fenômenos e processos tanto de engenharia como biológicos. Em termos de engenharia, interações interfaciais entre polímeros e fibras contribuem para a atuação mecânica dos compósitos, sobretudo os de matriz polimérica, pois são responsáveis pela transferência de tensões do polímero, relativamente pouco rígido e pouco resistente para as fibras (Silva, 2003).

O componente fásico de reforço aumenta a rigidez, a resistência mecânica e a resistência à fluência da matriz. As propriedades dos compósitos dependem não só de seus componentes, mas também da proporção entre eles, da interface e da morfologia do sistema (Freire, 1992, Castelanos 1987, English, 1987, Hayson et al, 1986).

Os reforços, hoje, mais utilizados são as fibras de vidro, fibra de carbono,

boro (metálico), aramida (orgânica e sintética). Os reforços de matrizes metálicas possuem uma utilização ainda restrita. No grupo das fibras naturais, pode-se citar como algumas das mais utilizadas: a juta, o sisal e algodão, além de inúmeras outras fibras como bambu, fibras de banana, coco, malva, algodão, sisal, rami, entre outras (Torreira, 1989).

Os materiais compósitos podem ser classificados da maneira como está apresentado na figura 2.

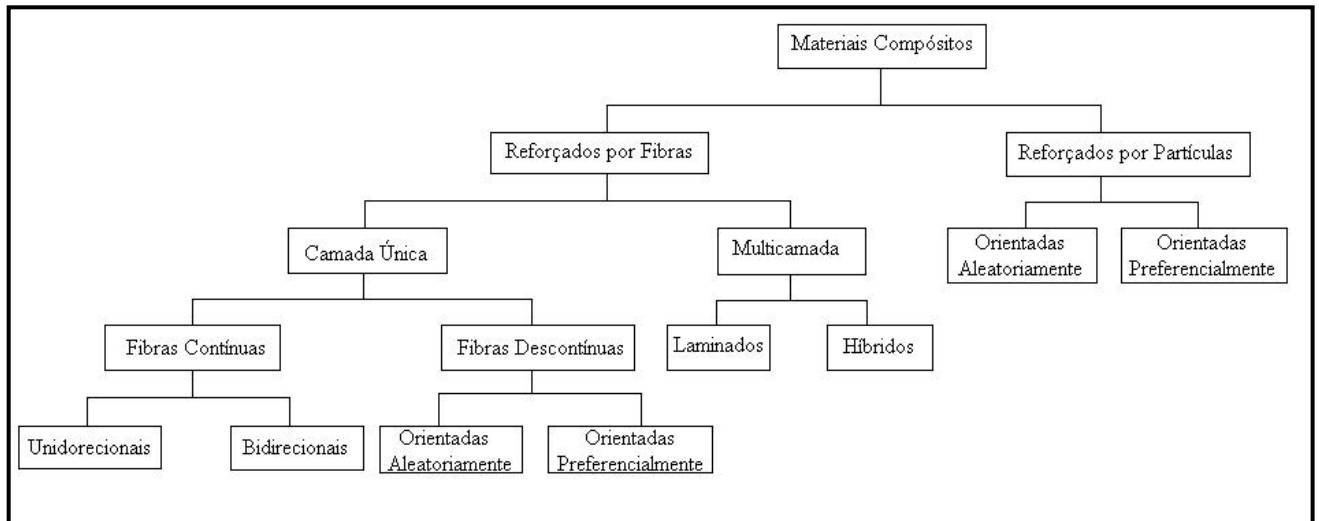


Figura 2: Organograma de classificação dos materiais compósitos (Mattheus e Rawlings, 1994).

O reforço fibroso caracteriza-se pelo seu comprimento ser muito maior do que a dimensão da sua seção transversal (diâmetro). Além disto as fibras podem ser consideradas contínuas (longas) ou curtas dependendo do tamanho crítico,  $l_c$ , que está associado ao seu diâmetro,  $d$ , bem como resistência da fibra,  $\sigma_f$ , e da interface. (Callister, 2002).

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (1)$$

É importante comparar as vantagens das tecnologias dos compósitos com as tecnologias dos materiais convencionais, ou seja, processos de fabricação e configuração de projeto. Sob este ponto de vista, ao se escolher um material para aplicação estrutural as variáveis mais importantes são o custo e a eficiência estrutural. Em geral, quanto menor o peso específico do material, maior é, tanto

sua eficiência estrutural, quanto seu custo e vice-versa. Assim, ao optar-se pelo uso de um material com custo ainda elevado, como os compósitos, deve-se considerar que a eficiência estrutural necessária para determinada condição de serviços, compense seus custos (Petrucci, 2004). A utilização de fibras leves e resistentes como reforço nos compósitos confere, aos mesmos, alta rigidez e alta resistência com baixa densidade quando comparados aos materiais metálicos tradicionais. Neste caso a relação custo/benefício pode ser favorável aos compósitos.

As aplicações dos diferentes processos de manufatura e o alto desempenho dos compósitos estruturais reforçados com fibras são provas de suas vantagens em relação aos materiais estruturais convencionais. Porém, em alguns casos, essas vantagens não são obtidas por um único tipo de fibra como reforço; uma combinação com diferentes tipos de fibras (compósitos híbridos) é necessária para corresponder às propriedades exigidas pelo projeto. Além disto, fibras na forma de tecidos ou emaranhados podem ser mais eficientes como reforços dos compósitos. De um modo geral, as outras vantagens dos compósitos são: (Silva, 2003)

- Em virtude do seu aspecto multifuncional, os compósitos são capazes de satisfazer diversas exigências de projeto;
- A economia de peso é significativa, cerca de 25 a 50% em relação aos materiais metálicos convencionais;
- Flexibilidade de seleção e mudança do estilo e considerações estéticas do produto. As freqüentes modificações no estilo, em resposta à necessidade do cliente podem ser feitas com baixos investimentos;

De acordo com Jones, (1999) além dos reforçados com fibras, outros tipos mais aceitos de materiais compósitos são os reforçados com *lâminas*. Estes são compostos por folhas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência, tal como encontrado na madeira e em plásticos reforçados com fibras alinhadas e contínuas. Os laminados também podem ser construídos empregando-se materiais na forma de tecidos, tais como algodão, o papel ou fibras de vidro trançadas, os quais são inseridos no interior de uma matriz de plástico. Dessa forma, um compósito laminar possui uma resistência relativamente alta em uma diversidade de direções no plano bidimensional;

Entretanto, a resistência em uma direção específica é, obviamente, menor do que

aquela que existiria se todas as fibras estivessem orientadas naquela direção. Outro tipo bastante utilizado de compósitos são os reforçados com *partículas*. Estes possuem duas subclassificações que são os reforçados com partículas grandes e reforçados por dispersão. A distinção entre essas duas subclassificações está baseada no mecanismo do reforço ou aumento de resistência. Para a maioria desses compósitos, a fase particulada é mais dura e rígida do que a matriz. Callister, (2002). Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente, a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração de carga. O grau de reforço ou melhoria no comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz – partícula. No caso dos compósitos que têm sua resistência aumentada por dispersão, as partículas são, em geral, muito menores, com diâmetros entre 0,01 e 0,1  $\mu\text{m}$  (10 e 100 nm); vale, entretanto lembrar que apesar da grande variedade dos compósitos reforçados tanto com lâminas quanto com partículas, os reforçados com *fibras* são, ainda, considerados como os mais importantes. Os objetivos de projetos de compósitos reforçados com fibras incluem com frequência resistência e/ou rigidez alta em relação ao seu peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo específico, os quais correspondem, respectivamente, às razões do limite de resistência à tração em relação à densidade relativa. Foram produzidos compósitos reforçados com fibras com resistências e módulos específicos excepcionalmente altos, que empregam materiais de baixa densidade para fibra e matriz (Callister, 2002).

### **2.1.3 - COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

Os polímeros utilizados como matrizes são comumente chamados de resina. A tabela 2 apresenta as faixas típicas de valores das propriedades dos dois tipos gerais de resinas, termofixos e termoplásticos.

Tabela 2: Comparação das faixas típicas das propriedades das resinas

<b>Propriedades</b>	<b>Termofixos</b>	<b>Termoplásticos</b>
Módulo de elasticidade (GPa)	1,3-6,0	1,0-4,8
Resistência à tração (GPa)	0,02-0,18	0,04-0,19
Temperatura máxima de serviço (°C)	50-450	25-230

As resinas poliméricas exercem muitas funções essenciais, como a de manter as fibras e/ou tecidos na orientação e posição adequada de modo que possam suportar as cargas desejadas. Assim, as resinas, como matriz, distribuem a carga quase uniformemente entre as fibras ou tecidos e servem como uma barreira à propagação de trincas garantindo toda a resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito. Um fator importante observado por Hyer, (1998) é que a limitação de um compósito pode ser uma função das propriedades da matriz. Como exemplo, a estabilidade térmica e a temperatura máxima de serviço do compósito são amplamente determinadas pela matriz polimérica que o constitui.

Shackelford, (1996), indicou que a diferença principal entre os polímeros está no comportamento característico quando aquecidos. Ou seja, os polímeros termoplásticos se fundem em um líquido viscoso capaz de sofrer processos de extrusão, e os termofixos se decompõem termicamente. As resinas termoplásticas constituem-se de cadeias moleculares lineares ou ramificadas que, ao serem aquecidas sob pressão, a sua consistência altera-se de sólida rígida para líquida viscosa (Shackelford, 1996). Nesse processo não ocorrem reações químicas ou decomposição e os produtos obtidos podem ser aquecidos repetidamente. Em outras palavras, as resinas termoplásticas podem “amolecer” seguidamente sob aplicação de calor e pressão e “endurecer” novamente



quando resfriadas. Estas resinas encontram atualmente grande aplicação como matriz de compósitos reforçados com fibras (Shackelford,1996).

Os materiais compósitos com matriz polimérica, além de poderem aliar uma boa resistência mecânica com boa ductilidade da matriz, oferecem a possibilidade de se obter materiais com combinações de propriedades desejadas (Monteiro et al., 1998). É possível, desenvolver novos materiais de engenharia, a base de compósitos poliméricos, através da mistura de duas ou mais substâncias ou ainda pela modificação de um solvente ou plastificante existente no polímero (Ezquerria et al, 2001; Callister, 2002, Osswald e Menges, 1995 e Mano, 1991). A qualidade do produto final processado é dependente, em parte, da forma como o compósito é misturado. Os compósitos, em geral, são considerados como materiais multifásicos que exibem uma proporção elevada da propriedade de seus constituintes (Callister 2002).

Os reforços aplicados aos compósitos poliméricos, sobretudo às fibras, propiciam melhorias em suas propriedades físicas e térmicas, modificam sua aparência superficial e características de processamento, além de reduzir o custo do material (Lavengood e Silver, 1988 e Freire, 1992).

A força de ligação entre a matriz e a fibra reforçadora é um fator determinante no desempenho de muitos compósitos poliméricos. Compósitos com baixa força de ligação matriz/fibra falharão à tensões relativamente baixas quando ensaiados transversalmente às fibras. Existe uma série de tratamentos feitos na superfície das fibras com a finalidade de se aumentar a força de ligação entre matriz/fibra. O nível de tratamento aplicado na superfície das fibras em um material compósito pode ter um grande efeito sobre sua resistência mecânica (Cantwell e Morton 1991; Gatenholm, 1997). Estes aspectos relacionados com o desenvolvimento de compósitos com matriz polimérica são de grande relevância para aplicações nos mais diversos setores da engenharia.

No setor da construção civil, há muito tempo, os compósitos poliméricos têm sido utilizados basicamente para reparos e adequações de pontes e edificações danificadas. No entanto, a deterioração da parte pavimentada da ponte (leito da ponte) é considerado um sério problema de infra-estrutura. Os avanços da manufatura de compósitos poliméricos reforçados por fibras, somados aos valores de resistência e rigidez desses materiais nas condições de uso, simulados em

laboratório, levaram à produção de módulos de leitos de pontes para reparos temporários ou permanentes em substituição à produção de leitos de concreto (Silvestre Filho, 2001).

Uma outra área da indústria da construção civil que tem dedicado atenção aos compósitos poliméricos estruturais na tentativa de minimizar os pesos das estruturas e diminuir os riscos de desabamento é a da construção de edificações em áreas sujeitas a abalos sísmicos. A prática de trançagem de fibras foi, por muito tempo, utilizada para obtenção de estruturas simples, de uso decorativo ou como cordas. Atualmente este processo vem sendo utilizado na produção de hastes, estacas, e tubos de menor peso aplicados no setor da construção civil, como componentes com exigências estruturais. O uso de fibras estruturais como o carbono, aramida, vidro tem viabilizado a obtenção de pré-formas trançadas, com a combinação de fibras (híbridos) ou não, cilíndricas ou planas impregnadas com termofixos ou termoplásticos. Estas estruturas trançadas, dependendo do tipo de fibra e matriz polimérica utilizada, tem apresentado, em geral, preços competitivos e interessantes valores de resistência e rigidez, resistência a corrosão e menor peso, (Silvestre Filho, 2001). O setor automobilístico vem empregando cada vez mais compósitos poliméricos em componentes de estofamentos, painéis, pisos e até proteções externas (Silvestre Filho, 2001).

#### **2.1.4 - MATRIZ DE POLÍMERO RECICLADO**

Os compósitos industriais nos quais um polímero orgânico, natural ou sintético é o principal componente, são encontrados sob os mais variados aspectos. Estes compósitos podem se apresentar em artefatos simples ou complexos, e ainda em produtos semi-manufaturados como placas, películas, fio ou fibras. Estes compósitos podem ser transparentes ou opacos, coloridos ou incolores, com superfície brilhante ou fosca, metalizados ou não, de textura compacta ou celular, duros ou macios, quebradiços ou flexíveis, resistentes ou frágeis, elásticos ou deformáveis, etc (Mano e Mendes, 2001).

Devido à sua capacidade de ser moldado, o polímero tem sido utilizado na produção de uma grande variedade de artigos de formas diversas o que também gera grande quantidade de resíduo (Petrucci, 2004). Atualmente o volume total de

reciclagem de polímeros, sobretudo como plásticos no Brasil, está aumentando cada dia mais, (ABIQUIM, 2009)

Os plásticos (polietilenos) têm sido considerados problemas ao meio ambiente, por muito tempo, por serem descartados de maneira incorreta pela população. O Brasil tem um consumo de plástico ainda inferior à Europa e Estados Unidos, mas a taxa brasileira de crescimento tem apresentado níveis superiores a esse mercado internacional, de uma maneira positiva. Há uma tendência de crescimento com velocidade muito maior, até porque o mercado dos plásticos tem correlação muito forte com o crescimento do PIB (Produto Interno Bruto). Se o PIB cresce 1%, o mercado dos plásticos cresce cerca de 2,5%. Costuma-se chamar isso de coeficiente de elasticidade. Portanto, se o PIB crescer 4%, o plástico deve crescer na faixa de 9% a 10% por ano. Essa é a média histórica de correlação dos últimos 25 anos, com um grau de confiabilidade bastante alto. Claro que esta correlação depende de estoques, disponibilidade de fabricantes e outros fatores. Ainda há uma lacuna grande na área de embalagem como um todo e, caso o consumo da população continue aumentando, isso tenderá a aumentar o consumo dos plásticos. (ABIQUIM, 2009).

O plástico já tomou muito espaço que antes era ocupado pelo vidro, papel, aço, alumínio e vários outros tipos de embalagem de uso doméstico, e, hoje está avançando constantemente, por ser um produto utilizado por todos os segmentos da população. Ele foi e ainda é considerado um vilão ambiental, pois parte da população ainda tem a percepção de que os plásticos contaminam o meio ambiente tendo em vista seu descarte que tem grande visibilidade (Petrucci, 2004).

Os resíduos plásticos podem ser classificados em: (Petrucci, 2004).

- Pré-consumo ou pós-consumo industrial: resíduos que provêm principalmente de sobras e aparas do processo de produção industrial;
- Pós-consumo: resíduos provenientes do descarte de produtos pelos consumidores.

Os resíduos plásticos chamam mais a atenção que outros materiais devido à total descartabilidade das embalagens que, associado ao fato de terem resistência à degradação e leveza, flutuam em lagos e cursos de água (Petrucci, 2004).

Quando os resíduos plásticos são depositados em lixões, os problemas

principais são a queima indevida e sem controle. Quando vão para aterros, dificultam a compactação do lixo e prejudicam a decomposição dos materiais biologicamente degradáveis, através da criação de camadas impermeáveis que afetam as trocas de líquidos e gases gerados no processo de biodegradação de matéria orgânica (Pinto, 1997).

A reciclagem, então, passa a ser a melhor alternativa para o destino do lixo plástico (Rolim, 2000). A reciclagem permite a economia de até 50% de energia na produção de plásticos. No Brasil, o maior mercado ainda é o da reciclagem primária (regeneração de um único tipo de resina separadamente), que absorve 5% de plástico consumido no país. As limitações à reciclagem estão na diversidade das resinas plásticas e nas suas diferentes cores. Polímeros termoplásticos reciclados, como o polietileno, apresentam um grande potencial para uso como matriz polimérica de compósitos reforçados com fibras. Na verdade, o polietileno é hoje o maior exemplo de plásticos reciclável (Nolasco, 1997).

### **2.1.5 - TIPOS E PROPRIEDADES DOS POLIETILENOS**

A partir da grande industrialização que se processou em meados do séc XIX, passou-se a trabalhar e obter polímeros como materiais de grande versatilidade e com um grande número de aplicações nas mais diversas áreas (Coutinho et al., 2003). As poliolefinas são polímeros termoplásticos de grande aplicação em diferentes áreas industriais, onde destaca-se os polietilenos e polipropilenos. Estes materiais apresentam características de compostos orgânicos apolares, com pobre hidrofiliabilidade, compatibilidade com polímeros polares e boa dispersão de cargas orgânicas (Mano e Mendes, 1998). Uma análise dos bancos de dados das tecnologias patenteadas revelou que a principal aplicação para os produtos obtidos com materiais poliméricos encontra-se na indústria de embalagens. Neste caso, merecem destaque os filmes produzidos a base de polietileno e polipropileno (Antunes et al, 2000).

Em condições normais, os polímeros etilênicos são não tóxicos, podendo ser usados em contato com produtos alimentícios e farmacêuticos. Os polietilenos são inertes à maioria dos produtos químicos comuns, devido a sua natureza parafínica, seu elevado peso molecular e sua estrutura parcialmente cristalina. Entretanto, dois

fenômenos podem ser observados comprometendo esta característica de inerte: (Coutinho, 2003).

a) Interação com solventes: sofrendo inchamento, dissolução parcial, aparecimento de cor ou completa degradação com o passar do tempo.

b) Interação com agentes tensoativos: resulta na redução da resistência mecânica do material por efeito de tenso-fissuramento superficial.

Atualmente os polietilenos são apropriadamente classificados como lineares e ramificados. As condições reacionais e o sistema catalítico empregado na polimerização têm definido cinco tipos diferentes de polietileno:

- Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE)
- Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM ou UHMWPE)
- Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD ou LLDPE)
- Polietileno de Ultra Baixa Densidade (PEUBD ou ULDPE)
- Polietileno de Baixa Densidade (PEBD ou LDPE)

Entre os tipos de polietilenos citados, destaca-se o PEBD, pois é o polímero utilizado como a matriz dos compósitos desenvolvidos neste trabalho. O PEBD é um polímero parcialmente cristalino, onde o processo de produção utiliza pressões entre 1000-3000 atmosferas e temperaturas entre 100-300°C .

A natureza exotérmica e as altas pressões conduzem à extensas ramificações na cadeia, as quais têm grande importância nas propriedades do polímero (McRae e Maddams, 1976).

O polietileno de baixa densidade tem uma combinação de boas propriedades tais como alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas. A tabela 3 descreve algumas dessas propriedades (Coutinho, 2003; Brandrup e Immergut, 1998, Bonelli, 1994). Estas propriedades variam de acordo com a cristalinidade e a massa molecular do polímero, o que explica a indicação de intervalo entre as propriedades descritas.

Tabela 3: Propriedades do polietileno de baixa densidade (Coutinho, 2003; Brandrup e Immergut, 1998).

<b>Propriedade</b>	<b>PEBD</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,910-0,925
Temperatura de fusão cristalina (°C)	102-115
Tensão de escoamento (MPa)	100-800
Resistência a tração (MPa)	6,9-10,6
Alongamento no escoamento (%)	150-600
Módulo elástico (MPa)	102-240

O polietileno de baixa densidade pode ser processado por extrusão, moldagem por sopro e por injeção. Assim é aplicado na produção de filmes para embalagens industriais e agrícolas, filmes laminados e plastificados para alimentos, embalagens para produtos farmacêuticos e hospitalares, brinquedos, utilidades domésticas, revestimentos de fios e cabos, tubos e mangueiras (Coutinho et al., 2003). Devido ao grande consumo do polietileno de baixa densidade no Brasil, este tipo de polietileno também é o que gera maiores quantidades de reciclados.

## **2.2 - FIBRAS VEGETAIS**

O termo fibras traduzido do Latim significa estruturas alongadas, que, dispostas em feixes, constituem tecidos animais e vegetais (Ferreira, 1986). As fibras naturais são originadas naturalmente de fontes vegetais (semente, caule, folha, fruto), fonte animal (secreções e pêlos) e de fonte mineral (amianto). Além disto, têm-se que as fibras sintéticas (carbono, vidro e aramida) são artificialmente produzidas. A importância das fibras naturais remonta ao homem primitivo e muitas das atuais fibras comerciais, sobretudo as derivadas da madeira, já eram economicamente utilizadas desde a mais remota antiguidade. O estudo de várias fibras vegetais empregadas pelo homem através dos tempos propicia, portanto, um excelente roteiro histórico sobre o progresso da civilização.

Fibras vegetais são todas as células esclerenquimatosas, isto é, aquelas que apresentam comprimento muito maior do que a largura. Dessa forma, do ponto de vista histológico, o termo fibra tem sido usado para designar uma grande variedade de tipos de células que se caracterizam pela forma alongada, parede secundária espessa e regular com a ocorrência de pontuações (Medina, 1959). Estas fibras vegetais podem apresentar teores elevados de celulose e lignina e por isto são conhecidas como fibras lignocelulósicas.

Segundo Cunha, (1998) também são designados como fibras os materiais utilizados como enchimento, como as painas e as sedas vegetais, e também para a confecção de cestos, ou na manufatura de escovas e vassouras, como a piaçava.

A produção de fibras vegetais lignocelulósicas ocupa uma posição de destaque na estrutura da economia agrícola mundial, ao mesmo tempo em que sua industrialização constitui um dos principais setores de atividades industriais. Pode-se dizer que, provavelmente, não existe nenhum material que seja mais utilizado na vida e com o qual os indivíduos tenham maior contato do que estas fibras naturais (Medina, 1959).

Dentre os principais objetivos da agricultura destacam-se os de produzir alimentos e fibras; nesses dois grupos estão incluídos os artigos de consumo mais importante da escala das necessidades do homem, indispensáveis, portanto, ao progresso da humanidade. Com exceção da seda, da lã e de outras fibras animais menos importantes, o restante das fibras naturais utilizadas pelo homem é de origem vegetal, ou seja são fibras lignocelulósicas (Medina, 1959).

O grupo constituído pelas fibras lignocelulósicas é o de maior importância, por sua extensão, diversificação de utilidades e seu emprego mais difundido. A par da sua participação no setor da indústria têxtil estas fibras concorrem como matéria prima básica ou complementar, às atividades de inúmeras outras indústrias como a automobilística. Além disto elas proporcionam às populações de regiões menos desenvolvidas, material para o fabrico de vestimentas e de diversos artigos de uso pessoal e doméstico de que necessitam. Na realidade, o número de plantas que podem fornecer fibras lignocelulósicas utilizáveis é muito grande e, neste caso em particular, a flora tropical encerra recursos inesgotáveis em potencial (Medina, 1959).

O uso e aplicação das fibras lignocelulósicas constitui-se em uma prática milenar, através de aplicações em cordoalhas, calçados, mantas, tapetes, bolsas e

etc. Estas aplicações dependem das características das fibras após sua obtenção das plantas originárias e dos processos de beneficiamento a que são submetidas (Cunha, 1998).

É praticamente impossível determinar com precisão o número de plantas que poderiam proporcionar fibras, seja para fins têxteis seja para outros fins, como simples material fibroso. Entretanto na prática atual somente algumas dezenas são efetivamente aproveitadas.

Segundo a parte vegetal de onde se originam, as fibras lignocelulósicas comercializadas no mundo podem ser agrupadas da seguinte forma: (Medina, 1959).

1. Sementes – algodão
2. Líber – juta, linho, cânhamo etc
3. Folha – sisal, abacá, piaçava e etc
4. Fruto – coco e paina
5. Raiz – zacetão

Algumas delas, como algodão, juta, linho e sisal são as de maior significação econômica. Não é improvável, contudo, que algumas fibras têxteis atualmente de valor secundário possam um dia tornar-se sucedâneas de outras fibras tradicionais ou então que, com o desenvolvimento da tecnologia, tenham seu aproveitamento industrial intensificado e passem a ocupar o grupo das fibras primárias.

Atualmente as fibras naturais lignocelulósicas têm sido utilizadas nos mais diversificados segmentos artesanais e industriais (Silva, 2006):

- Indústria têxtil
- Indústria automotiva
- Indústria de celulose
- Indústria calçadista
- Indústria da construção civil

A utilização das fibras naturais, vegetais ou de celulose natural, como material de reforço pelo homem, já existe há muito tempo. Como já foi comentado, o capim, palha de arroz ou de milho era misturado ao barro para a fabricação de adobe em tijolos ou paredes reforçadas, para diminuir a fragilidade deste, tornando-o menos quebradiço. Até os dias de hoje essa prática vem sendo cada vez mais crescente. A forma fibrosa apresentada pela celulose proporciona a este material requisitos



necessários para diversas aplicações na área de engenharia. As fibras lignocelulósicas, em sua maioria, apresentam propriedades mecânicas relativamente baixas em relação às fibras sintéticas, porém são materiais atrativos principalmente pelo custo e caráter ecológico. Essas fibras existem em grande quantidade no Brasil e são de fácil manufatura (Silva, 1991).

### **2.2.1 - CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES DAS FIBRAS VEGETAIS**

Como já foi dito, fibras vegetais lignocelulósicas são classificadas de acordo com sua origem e podem ser agrupadas em fibras de semente (algodão), fibras de caule (juta, linho e cânhamo), fibras de folhas (bananeira, sisal, piaçava, curauá), fibras de fruto (coco) e fibras de raiz (zacatão) (Morassi 1994). As fibras oriundas do caule ou das folhas são chamadas de fibras duras e são as mais usadas como reforço em compósitos poliméricos.

Comparativamente às fibras sintéticas, as fibras lignocelulósicas oferecem as seguintes vantagens: fonte abundante e de rápida renovação, baixo custo, baixa densidade, são menos abrasivas se comparadas às fibras de vidro, não tóxicas e biodegradáveis (Bledziki e Gassan, 1999). Como desvantagem pode-se citar a baixa temperatura de processamento, limitada a aproximadamente 200°C. Outras desvantagens são a falta de uniformidade das propriedades, que dependem da origem da fibra, da região do plantio e da habilidade manual durante a colheita e a alta absorção de umidade provocando o inchaço das fibras. A absorção de umidade pode ser reduzida pela modificação química das fibras e pela boa adesão na interface fibra/matriz (Silva, 2003).

Na tabela 4 são apresentados dados comparativos das propriedades de fibras vegetais e fibras sintéticas de reforçamento convencional.

Tabela 4: Propriedades mecânicas e características das fibras vegetais e fibras convencionais utilizadas como reforço. (Mohanty et al, 2000; Bledzki e Gassan, 1999; Baley et al, 1997 e Gassan e Bledzki, 1999).

<b>Fibra</b>	<b>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
Algodão	16-21	1,5-1,6	287-597	5,5-12,6	7-8
Juta	200	1,3	393-773	26,5	1,5-1,8
Linho	–	1,5	345-1035	27,6	2,7-3,2
Cânhamo	–	–	690	–	1,6
Rami	–	1,5	400-938	61,4-128	3,6-3,8
Sisal	50-300	1,45	511-635	9,4-22	3-7
Coco	100-450	1,15 -1,45	131-175	4-13	15-40
Kevlar-49	12	1,48	2800-3792	131	2,2-2,8
Carbono	7-10	1,6-1,9	4000	230-240	1,4-1,8

Os principais componentes químicos das fibras vegetais lignocelulósicas são substâncias polares, tais como celulose, hemicelulose (ou polioses) e a lignina, com menores percentuais de outros componentes como pectina, cera e substâncias solúveis em água. A composição química varia de acordo com a região de cultivo, tipo de solo e condições climáticas. A composição de algumas fibras é apresentada na tabela 5 e varia ligeiramente com a região de cultivo, tipos de solo e condições climáticas.

Cada fibra é constituída de várias fibras elementares fortemente ligadas entre si por um material de cementação, constituído principalmente de lignina. A constituição elementar de uma fibra é mostrada na figura 3.

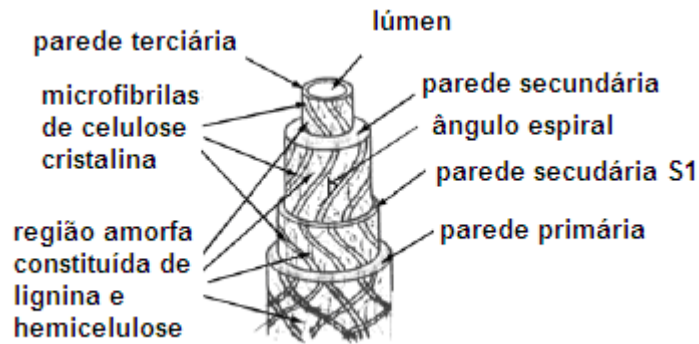


Figura 3: Constituição estrutural de uma fibra vegetal. (Rong et al, 2001)

A fibra lignocelulósica típica possui uma parede espessa formada por várias microfibrilas, figura 3, que formam espirais ao longo do eixo da fibra, tendo um material permeável ou vazio, denominado lúmen, no centro. Cada fibra é, em essência, um composto natural no qual as microfibrilas de celulose estão envolvidas por uma matriz de lignina e hemicelulose. A lignina atua como material de cementação, unindo as microfibrilas e a hemicelulose como interface entre a microfibrila e a lignina.

As fibras diferem em sua composição e na orientação das fibrilas (ângulo espiral). Tais características dependem da origem da fibra e são determinantes nas suas propriedades mecânicas (Satyanaraiana, 2007 e Mohanty, et al, 2000). A tabela 4 mostra as propriedades mecânicas e características de algumas fibras. Nota-se que a fibra de coco tem o menor valor de resistência à tração o que é atribuído ao fato desta fibra apresentar baixo teor de celulose. A lignina possui uma estrutura complexa. É um material amorfo encontrado nas paredes celulares das plantas, cuja função é conferir rigidez à parede celular. A celulose é o componente principal de todas as fibras vegetais e o principal responsável pela sua resistência mecânica. É constituída de anidro-D-glicose ( $C_6H_{10}O_5$ ), que unidas formam uma cadeia molecular. Sua estrutura é mostrada na figura 4.

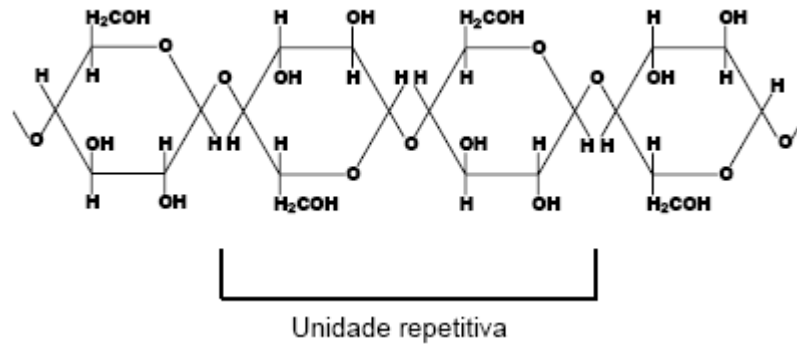


Figura 4: Estrutura da celobiose, estrutura repetitiva da celulose. (Frengel e Wegener, 1989).

Devido às ligações de hidrogênio, as fibras vegetais são de natureza hidrofílica. Esse é, talvez, o maior problema das fibras vegetais, se usadas como reforço de compósitos poliméricos, pois são incompatíveis com a maioria dos polímeros que são hidrofóbicos. Sua natureza hidrofílica influencia todas as propriedades mecânicas e físicas, tanto das fibras quanto dos compósitos. Por outro lado sua natureza rica em hidroxilas sugere que elas sejam úteis em sistemas termorrígidos

Tabela 5: Composição química provável de algumas fibras vegetais (% em peso) (Bledzki e Gassan, 1999; Bisanda, 1992).

	<b>Sisal</b>	<b>Coco</b>	<b>Algodão</b>	<b>Juta</b>	<b>Linho</b>	<b>Rami</b>
Celulose	67-78	36-43	82,7	61-71,5	64,1	68,6
Hemicelulose	10-14,2	0,15-0,25	5,7	13,6-20,4	16,7	13,1
Lignina	8-11	41-45	–	12-13	2,0	0,6
Pectina	10	3-4	5,7	0,2	0,2	1,9
Ceras	2	–	0,6	0,5	0,5	0,3
Teor de umidade	11	–	10	12,6	10	8,0

A utilização de fibras naturais lignocelulósicas em compósitos poliméricos apresenta um aspecto promissor relativamente às questões ambientais principalmente pelo fato de serem fontes de captação de dióxido de carbono na atmosfera, principal gás do efeito estufa, durante sua fase de cultura. Isto as torna neutras em relação à emissão de dióxido de carbono ao final de seu ciclo de utilização (Santiago, 2005).

### **2.2.2 - FIBRAS VEGETAIS DE EMPREGO PRÁTICO E INTERESSE PARA COMPÓSITOS**

Como foi enfatizado, o novo paradigma de se preservar o meio ambiente e de se utilizar produtos naturais, vem contribuindo para um maior interesse na utilização de materiais de origem natural, como as fibras naturais lignocelulósicas (Silva, 2003). Atualmente a utilização destas fibras como reforço em compósitos de matriz polimérica tem despertado interesse na sociedade e na indústria. Por um lado por garantir a fixação e subsistência do homem no campo e, por outro, pela possibilidade de se desenvolver materiais de custo menor e com características ambientalmente corretas (Abbot et al, 1972, Ko, 1975; Bledziki e Gassan, 1999).

A diversidade das fibras existentes em nosso planeta é um fator de grande importância prática para a fabricação de materiais ambientalmente corretos, tais como compósitos por elas reforçados (Satyanaraiana 2007, Leão, 1997; d'Almeida e Monteiro, 2003, Machado et al, 2002). Algumas delas serão tratadas, a seguir, de maneira sucinta:

A cultura do **sisal** (*Agave sisalane*) foi desenvolvida pelos Maias, no México, antes da chegada dos europeus. Atualmente são conhecidas 57 espécies Chavami, (1999). A cultura sisaleira começou a ser difundida no Brasil a partir de 1920, no estado da Paraíba. A cultura de sisal, uma das fibras mais utilizadas mundialmente, é de extrema importância sócio-econômica para Brasil, por ser a única economicamente viável na região semi-árida do Nordeste, com cerca de um milhão de pessoas que dela dependem para sua subsistência (Mattoso et al., 1997). O Brasil é o maior produtor de sisal do mundo e a Bahia é responsável por 80% da produção da fibra nacional (Costa e d'Almeida, 1999).

As fibras de **coco** são extraídas do fruto do coqueiro comum, **Cocos**

**nucifera**. No Brasil o coco chegou em 1553 a bordo das embarcações portuguesas, provenientes das ilhas do Cabo Verde, para onde, por sua vez, também haviam sido levados pelos portugueses ([www.bibvirt.futuro.usp.br](http://www.bibvirt.futuro.usp.br)). No Brasil a área cultivada ocupa cerca de 300 mil hectares e os maiores produtores são os estados do Alagoas, Sergipe e Bahia. Uma grande quantidade da casca do coco é negociada como resíduo quando, de fato, constitui uma fonte de matéria-prima para uso em aplicações industriais (Salazar, Leão, 2000). As fibras de coco têm ampla utilização na fabricação de capachos, sacos, escovas, redes, colchões, esteiras e etc. Além da fibra e da madeira, o coqueiro fornece alimentos como a polpa, água de coco, óleo, produtos cosméticos, ração animal e etc. ([www.bibvirt.futuro.usp.br](http://www.bibvirt.futuro.usp.br))

Neste universo das fibras vegetais, também merece destaque a fibra de **curauá (*Ananás erectifolius*)**, planta natural da Amazônia, cultivada nos caminhos dos roçados e nos terreiros pelos nativos da região. Atualmente com o reconhecimento das qualidades das fibras de curauá, como resistência física, flexibilidade, comprimento e leveza, o seu cultivo tem tomado status no plantio industrial, com novas recomendações agronômicas referentes ao espaçamento, adubação e o melhoramento genético na produção de mudas. Diante de tantas inovações a cadeia produtiva do curauá tornou-se concreta (Silva, 2006).

A fibra do **rami (*Bochmeria nivea*)** pertence à família das fibras longas, tendo em média 150 a 200 mm de comprimento, a exemplo do linho, juta, sisal e cânhamo. Apresenta alta resistência, sendo considerada três vezes superior à do cânhamo, quatro vezes à do linho e oito vezes à do algodão.

O rami pode ser utilizado em diversos segmentos: fabricação de tecidos, cordas e barbantes, como também pode gerar a celulose para a produção de papel moeda, devido à sua resistência. Além disso, pode ser empregado na fabricação de mangueiras, pneus, fios de pára quedas, etc. A cultura do rami está totalmente concentrada no Paraná, principalmente no município de Londrina. Essa região reflete todo o panorama da cultura do rami no Brasil, de forma que todos os índices de área e produtividade nacionais desse cultivo são devidos à plantação de rami realizada no Paraná (Savastrano Jr 1997).

A palmeira ***Attalea funifera mart***, conhecida por **piaçava** ou piaçaba, é espécie nativa e endêmica do sul do Estado da Bahia. Produtora de fibra longa, resistente, rígida, lisa, de textura impermeável e de alta flexibilidade, a piaçava se

desenvolve bem em solos de baixa fertilidade e com características físicas inadequadas para a exploração econômica de muitos cultivos (Moreau, 1997). A necessidade de poucos recursos financeiros para o plantio, a manutenção e exploração, tornam a fibra de piaçava uma opção agrícola atraente, pelos reduzidos riscos e altos rendimentos que proporciona ao investidor (Aquino, et al 2001).

A importância econômica da piaçaveira está na extração das suas fibras industriais, destacando-se a fabricação de vassouras, enchimento nos assentos de carros, cordoaria e escovões. O resíduo obtido de sua limpeza, o qual é conhecido como bagaço, fita ou borra, serve para cobertura de casas no meio rural e urbano. Atualmente este produto é muito utilizado na cobertura de quiosques em áreas de lazer como sítios, clubes e praças (Aquino, et al 2001).

O **algodão** é uma fibra branca ou esbranquiçada obtida dos frutos de algumas espécies do gênero *Gossypium* família Malvaceae. As fibras são colhidas manualmente ou com a ajuda de máquinas. De uma forma ou de outra, as fibras sempre contêm pequenas sementes negras e triangulares que precisam ser extraídas antes do processamento das fibras. As fibras são, de fato, pêlos originados da superfície das próprias sementes. Estas sementes ainda são aproveitadas na obtenção de um óleo comestível. O algodoeiro é explorado no Nordeste brasileiro, dependendo das condições de cultivo e da colheita, se pouco ou muito precoce; é uma planta perene, que produz economicamente por quatro a cinco anos. As fibras resíduos são curtas, medem menos que 5mm, o que as direciona para reforço de pastas; além disso, são disponíveis a preço relativamente baixo e de forma concentrada geograficamente, junto aos centros geradores (Savastrano Jr, 1997).

Além de todas estas acima mencionadas, uma fibra natural lignocelulósica que vem sendo extensivamente investigada e utilizada pela nossa sociedade, inclusive reforçando compósitos poliméricos é a **juta** (Bledzki e Gassan, 1999, d'Almeida e Monteiro, 2003). Esta fibra foi utilizada como reforço na fabricação dos compósitos de matriz polimérica propostos nesta tese.

### 2.2.3 – AS FIBRAS DE JUTA

A **juta** (*corchorus capsularis*) é uma fibra têxtil vegetal que provem da família das "tiliáceas". Esta erva lenhosa alcança uma altura de 3 a 4 metros e o seu talo tem uma grossura de aproximadamente 20 mm, crescendo em climas úmidos e

tropicais. A época de semear varia, segundo a natureza e o clima. As plantas florescem 4 a 5 meses depois de semeadas e inicia-se imediatamente a colheita. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo de maceração. As árvores cortadas rentes ao solo por meio de foice são limpas das folhas, postas em feixes dentro da água corrente ou parada. A alta temperatura das regiões nas quais é cultivada favorece a fermentação e desta forma consegue-se a maceração em 8 a 10 dias permitindo, assim, a fácil retirada da casca da planta e separação da fibra da parte lenhosa do talo. Enxagua-se e empacota-se ([www.bibvirt.futuro.usp.br](http://www.bibvirt.futuro.usp.br))

O maior fornecedor de juta é Bangladesh, onde é cultivado em solo aluvial, solo pedregoso formado pelas enchentes dos estuários dos rios das regiões dos deltas dos Ganges e da Bralmaputra. Depois da terra arada, as sementes são espalhadas entre Fevereiro e Junho de acordo com as condições climáticas. As fibras de juta têm aparência do linho, mas tem características irregulares no lúmen. Isto é causado por variações nas paredes celulares que são grossas em algumas partes e extremamente finas em outras. A força de tensão não é grande em comparação com outras fibras e a elasticidade é baixa, mas isso se torna vantajoso para a fabricação de sacos porque significa que eles manterão sua forma quando carregado. Quimicamente, a juta difere de outras fibras multicelulares, por conter uma considerável quantidade de lignina que, geralmente, é acompanhada pela celulose nos tecidos lenhosos. A juta é dificilmente alvejada, pois ela sofre degradação quando tratada com cloro, especialmente, em solução alcalina ([www.bibvirt.futuro.usp.br](http://www.bibvirt.futuro.usp.br)).

As melhores qualidades de juta distinguem-se pela robustez das fibras e pela cor branca e brilhante do talo; as qualidades inferiores distinguem-se pela cor dos talos, que são mais escuros pelo menor comprimento das fibras, de cor mais acinzentada, a par de terem menor resistência (d'Almeida 1987).

O principal componente da juta é a celulose sob a forma de linho-celulose. A juta tem boas afinidades para corantes e é muito higroscópica, regulando a umidade em 12%, o que a torna matéria prima ideal para sacaria, evitando tanto o ressecamento quanto a fermentação do produto acondicionado.

É uma cultura fácil acompanhada de uma maceração trabalhosa e de pouco rendimento sem o uso de agrotóxicos ou fertilizantes. Introduzida no Brasil por



Riyota Oyama, a cultura foi feita inicialmente por japoneses, tornando-se a seguir uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica, sendo um fator fundamental da fixação de mais de 50 mil famílias ao campo (Leão et al 2000).

A cultura da juta, já por quase meio século, é importante para a economia da região amazônica, em função de sua capacidade de fixação da população no campo e da utilização de forma produtiva das áreas de várzea na extensão do Rio Amazonas, mais especificamente nos municípios localizados à margem do rio nos estados do Amazonas e Pará. Isto se deve, em grande parte, à relativa facilidade de exploração regional dessas plantas e ao sucesso da comercialização das fibras no mercado nacional, aliado à extraordinária adaptação da juta na região e à presença da malva, nativa no Estado do Pará e posteriormente cultivada no Estado do Amazonas.

As fibras e a planta de juta, figura 5, chamadas comercialmente de "fibras moles" são empregadas na confecção de telas e tecidos de aniagem, serrapilheiras, cordas, barbantes, tapetes, etc. Em relação ao seu emprego na indústria têxtil, as fibras de juta têm uma pequena pigmentação e podem ser tingidas sem alvejamento. Difere também por ter moderada afinidade para tingimentos básicos (Mohanty et al, 2000).



Figura 5: Planta de juta e suas fibras na etapa de secagem.

Além de fibra, a juta tem sido muito utilizada na forma de tecido para reforçar

compósitos poliméricos, acarretando uma melhora nas propriedades mecânicas desses materiais.

### **2.3 – COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS**

A utilização de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais não é recente e as primeiras patentes datam a década de 60. Durante os anos 70 e 80, as fibras sintéticas substituíram as fibras vegetais, devido ao seu melhor desempenho e a seus aspectos econômicos. A partir da década de 90, uma visão mais realística ou “ecológica” do processo industrial fez ressurgir o interesse em matérias renováveis, tais como as fibras e os óleos vegetais, principalmente na indústria automotiva. Há também os aspectos tecnológicos e as vantagens econômicas no uso destes materiais. A questão social é também um forte argumento para o incentivo de produção destes compósitos, uma vez que estes materiais são geralmente oriundos de regiões economicamente pobres (Bledzik e Gassan 1999, Nabisahed e Jog 1999, Mohanty et al, 2000, Eichorm et al 2001; Monteiro et al, 2009 e 2006).

As fibras vegetais mais utilizadas como material de reforço em compósitos poliméricos são as fibras de sisal, coco, juta e banana, além de fibras de madeira, bagaço e bambu (Thwe et al. 2003). As propriedades mecânicas destes compósitos dependem de alguns fatores, tais como fração volumétrica, razão de aspecto, distribuição e orientação das fibras, adesão a matriz-fibra e composição química da matriz polimérica e das fibras. As resinas termorrígidas mais utilizadas nestes compósitos são as fenólicas, poliésteres, epóxis, e poliamidas. Dentre as resinas termoplásticas, o destaque é para o polietileno, de baixa densidade e o polipropileno (Youngquist, 1986).

As matrizes termorrígidas apresentam um enorme potencial para a utilização das fibras vegetais, pois, neste caso, pode-se utilizar métodos de processamento bastante simples e de baixo custo, além de utilizar com vantagens fibras contínuas, sem a necessidade de se promover alterações nos procedimentos e/ou equipamentos de processamento. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por polímeros termorrígidos (Antunes, 2000)

Entre inúmeras aplicações, os compósitos reforçados com fibras vegetais possuem um enorme potencial de aplicação estrutural e não-estrutural na indústria automotiva. A indústria automotiva europeia se destaca neste ramo, principalmente

a Alemanha, que trabalha no intuito de produzir veículos com todos os componentes recicláveis ou biodegradáveis. Além dos aspectos “ecológicos”, o principal incentivo para a destes compósitos é a redução de custo e peso dos veículos. Uma importante característica destes materiais é a capacidade de fraturar sob impacto sem soltar lascas. Outras vantagens são a estabilidade dimensional e a resistência às intempéries ambientais (Antunes, 2000).

Segundo um estudo produzido pelo ministério da agricultura da Inglaterra, até 20 kg de fibras naturais poderiam ser utilizadas em cada veículo. Na atualidade, de 5 a 13 kg de fibras naturais por veículo são utilizados (Bledziki e Gassan 1999).

A aplicação de compósitos com fibras naturais na industria automotiva incluem: painel (console), revestimento das portas, cintos, partes acolchoadas, painel traseiro e painéis solares.

## 2.4 - COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM JUTA

Vale ressaltar que, dentre as fibras utilizadas como reforço de materiais compósitos, a juta aparece como um promissor material para reforço de compósitos, pois é relativamente barata e globalmente disponível no mercado. Esta fibra possui alta resistência (Shah e Lakkad 1981) e é um ótimo substituto para fibras sintéticas em muitas aplicações.

A tabela 6 apresenta algumas propriedades mecânicas da fibra de juta. Satyanarayana (2007).

Tabela 6. Propriedades mecânicas da fibra da juta (Satyanarayana, 2007).

<b>Propriedade</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Tensão máxima em tração (MPa)</b>	<b>Deformação total (%)</b>	<b>Módulo de Flexão (GPa)</b>
Fibra de juta	10-30	400-800	0,7-1,8	0,3-0,5

Fibras sintéticas de vidro, boro, carbono e aramida têm sido muito usadas como reforço de materiais plásticos na matriz de compósitos, como substituto de materiais estruturais e não estruturais. A razão principal para o uso dessas fibras

como reforço é devido ao elevado módulo específico, rigidez elevada e boa relação entre peso e resistência. Entretanto, estas fibras são comparativamente caras e consomem muita energia para sua fabricação. Por isso fibras naturais lignocelulósicas como de banana, sisal e juta estão atraindo a atenção de cientistas para sua utilização na área da engenharia. Sabe-se que compósitos reforçados com estas fibras vegetais possuem boa resistência elétrica e boa resistência à fratura (Shah e Lakkad, 1981).

Cabral et al, (2005), estudaram o comportamento mecânico de compósitos com matriz de polipropileno reforçados com fibras de juta e constataram um aumento no módulo de Elasticidade, figura 6, e na resistência a tração.

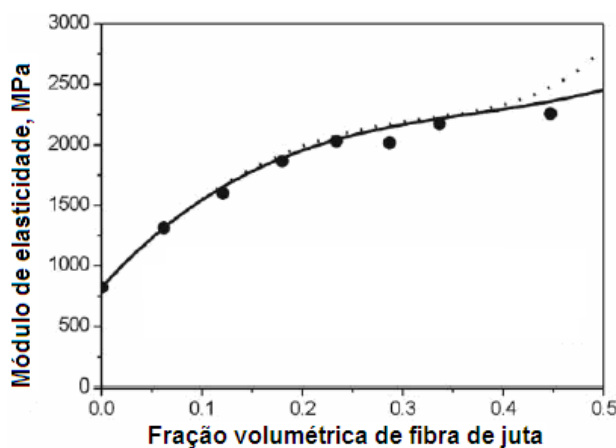


Figura 6: Aumento do módulo de Young em função do aumento da fração volumétrica de fibras (Cabral et al., 2005).

Segundo Mohanty et al., (2006), um aumento de até 30% em volume no teor de fibras de juta em compósito de matriz de polietileno de alta densidade acarretou um aumento nas propriedades de resistência a flexão, resistência à tração e resistência ao impacto dos compósitos estudados. Tal comportamento é devido ao reforço que a fibra confere à matriz, permitindo uma distribuição uniforme de tensão entre a matriz polimérica e a fase dispersa (Colom et al, 2003). Os resultados desse aumento podem ser observados na tabela 7. Frações volumétricas maiores que 30% de fibra de juta acarretaram uma diminuição nas propriedades de resistência a flexão e resistência ao impacto devido a formação de microtrincas na interface fibra/matriz e uma não uniformidade na transferência de tensões, havendo aglomerações dentro

da matriz polimérica (Thwe e Laio, 2003).

Tabela 7: Efeito do aumento da fração volumétrica de fibra de juta nas propriedades mecânicas (Mohanty et al, 2006)

Fibras (%)	Resistência a tração (MPa)	Resistência a flexão (MPa)	Resistência ao impacto (J/m)
0	20.82	24.07	32.57
10	23.47	26.34	40.82
20	25.68	29.17	46.73
30	27.24	34.83	51.28
45	22.00	27.72	45.80

#### 2.4.1- FRATURA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A caracterização das propriedades mecânicas de compósitos não é uma tarefa simples. A primeira questão que surge é como aplicar os métodos desenvolvidos para materiais homogêneos, aos materiais compósitos. Este é especialmente o caso das propriedades locais, como os parâmetros de resistência ao impacto e tenacidade à fratura (Burzic et al., 2001, Sundenstricker et al, 2003).

A figura 7 mostra vários mecanismos de falhas que podem ocorrer em compósitos reforçados com fibras naturais. A fratura raramente ocorre de modo catastrófico, mas tende a ser progressiva, com falhas críticas dispersas através do material (Anderson 1995).

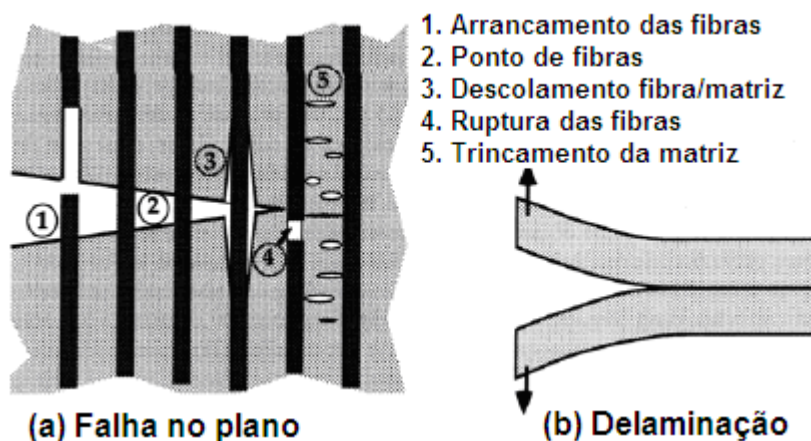


Figura 7: Mecanismos e falhas em materiais compósitos. (Anderson, 1995).

Os mecanismos de falha local que podem ocorrer durante a fratura de compósitos reforçados com fibras são: a ruptura das fibras, a deformação e o trincamento da matriz, o descolamento das fibras, o deslizamento interfacial seguido de ruptura das fibras e ainda o efeito denominado ponte de fibras, onde as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras. Vários desses mecanismos podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito. A importância de cada mecanismo no processo de fratura dependerá do tipo de compósito em estudo, do tipo de carregamento aplicado, e da orientação das fibras (Silva, 2003).

Segundo Harmia, (1996), quando as fibras estão orientadas paralelamente à direção de propagação da trinca, observam-se o descolamento das fibras, e quando elas estão orientadas perpendicularmente, deslizamento e fratura das fibras são observados.

Pelo acima exposto, verifica-se que a condição interfacial é o fator importante e governa o comportamento tensão-deformação dos compósitos. A interface fibra/matriz é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço e suas propriedades são específicas para cada sistema fibra/matriz. Existem métodos experimentais para determinar a resistência interfacial, como os ensaios de pullout (Harmia, 1996).

Além das fibras consideradas separadamente, tecidos e aglomerados prensados previamente confeccionados com fibras lignocelulósicas também são utilizados como eficientes reforços para matrizes poliméricas de compósitos.

## **2.5 - COMPÓSITOS REFORÇADOS COM TECIDO DE JUTA**

O uso de tecido de juta como reforço de compósitos poliméricos tem sido estudado nesta última década (Gowda et al, 1999). A fibra de juta exibe rigidez relativamente maior se comparada ao tecido de juta, devido ao maior alongamento inicial do tecido do que o da fibra, como pode ser observado na figura 8.

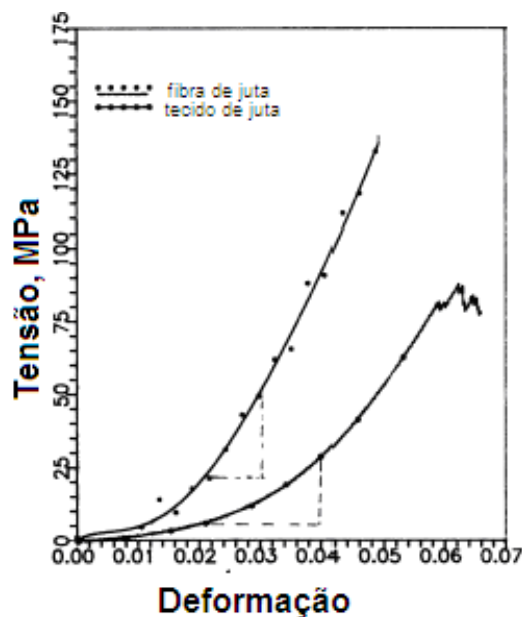


Figura 8: Gráfico tensão deformação da fibra e do tecido de juta. (Gowda et al., 1999)

Tanto para a fibra quanto para o tecido, figura 8, as curvas são inicialmente quase horizontais devido ao efeito do alongamento causado pela remoção de espaços no sistema. Os cordões no tecido se rompem separadamente e cada fibra se estende até a fratura quando alcança sua tensão máxima de fratura. A resistência à tração da fibra de juta como recebida e do tecido, obtidas através de testes mecânicos foi de 120 MPa e de 85 MPa respectivamente. Essa variação dos valores de resistência pode ser devido a: 1) a área de seção transversal de cada fio ser circular e 2) diferença na resistência das fibras individuais no tecido (Gowda et al, 1999).

Vale lembrar que a resistência à tração dos materiais compósitos depende, principalmente, da resistência das fibras, da estabilidade e resistência da matriz bem como da efetiva interação entre matriz e fibras, no que diz respeito à transferência de tensão através da interface (Gao, 1992). No caso de um tecido, como o de juta, tanto sua resistência quanto a interação com a matriz polimérica envolvem fatores mais complexos do que ocorre para as fibras consideradas separadamente. Alguns desses fatores serão analisados no próximo item deste capítulo.

A figura 9 apresenta um gráfico de tensão-deformação que compara

propriedades de tração de um compósito com matriz de poliéster reforçado com tecido de juta e de uma resina de poliéster pura.

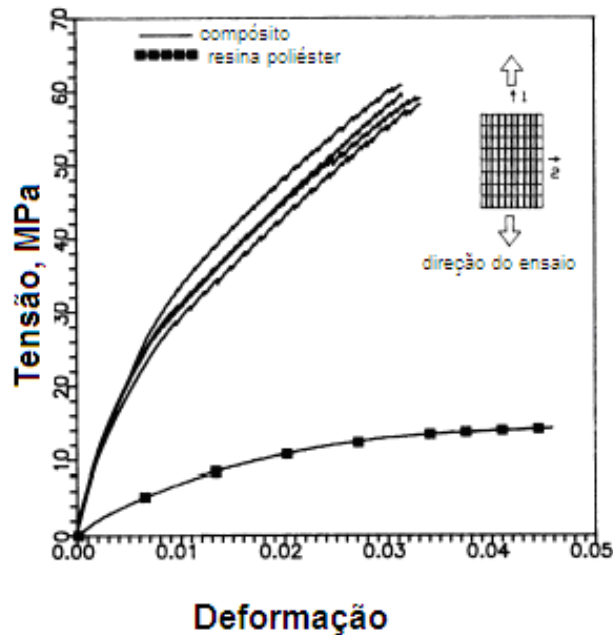


figura 9: Gráfico tensão-deformação de um compósito polimérico com matriz de poliéster reforçado com tecido de juta e da resina pura.( Gowda et al., 1999).

A parte linear da curva correspondente ao compósito, representa o comportamento elástico dos compósitos poliméricos reforçados com tecidos de fibras de juta. O fim da linearidade da curva mostrada na figura 9 é devido ao início da formação de trincas ou a existência de danos tecido. A primeira maior mudança na curva corresponde à primeira trinca (ou rasgo) formada no tecido. O rompimento da primeira fibra ocorre a um nível de tensão de, aproximadamente, 26 MPa e a resina começa a falhar a um valor de tensão bem mais baixo do que o tecido, 5,5 MPa, para a mesma quantidade de deformação. O restante da curva é devido à falha progressiva das outras fibras devido ao aumento da tensão aplicada. A extremidade da curva representa a tensão final acarretando no rompimento da fibra (Gowda et al., 1999).

Tecidos híbridos estão sendo amplamente difundido nas indústrias aeroespacial e automobilística, em estruturas complexas, devido à facilidade de manipulação e controle de muitas de suas propriedades (Carvalho e Cavalcanti 2006).

Medeiros et al, (2002), estudaram a resistência a flexão e impacto de compósitos à base de resina fenólica reforçada por tecidos híbridos de juta e algodão. Foi reportado neste trabalho que, mesmo o plástico reciclado, tem suas propriedades



mecânicas melhoradas quando é adicionado algum tipo de reforço, podendo, assim ser usado em novas aplicações tecnológicas.

A figura 10 mostra uma fotografia de um tecido híbrido formado por fios entrelaçados de algodão e juta.

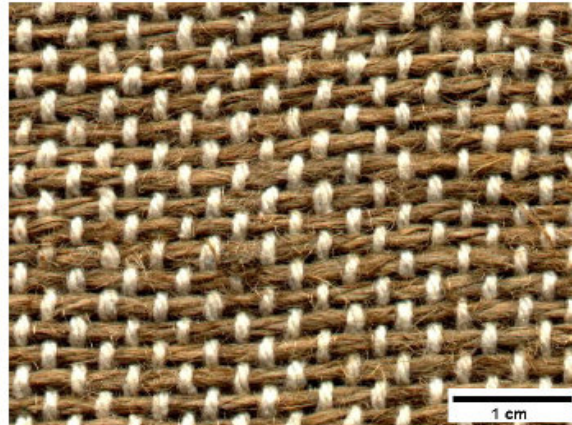


Figura 10: Tecido híbrido de algodão e juta (Medeiros, 2002).

## 2.6 - TEORIA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE TECIDOS COM DANOS

Atualmente os tecidos são utilizados como material de reforço em compósitos de matriz polimérica e vários mecanismos de fratura são desenvolvidos e vários trabalhos foram publicados a respeito do crescimento de trincas em tecidos (Smith, 1976; Carless, 1992; Dutson, 1993 e Monteiro et al, 2005).

Os danos em tecidos foram estudados através de modelamento matemático que permite simular sua consequência sobre o comportamento mecânico do tecido (Godfrey e Rossetos, 1999 (a), (b), (c)). Nestes trabalhos o tecido modelado corresponde a uma trama quadrangular de fios que se atritam nos pontos de cruzamento, como indicado na figura 11.

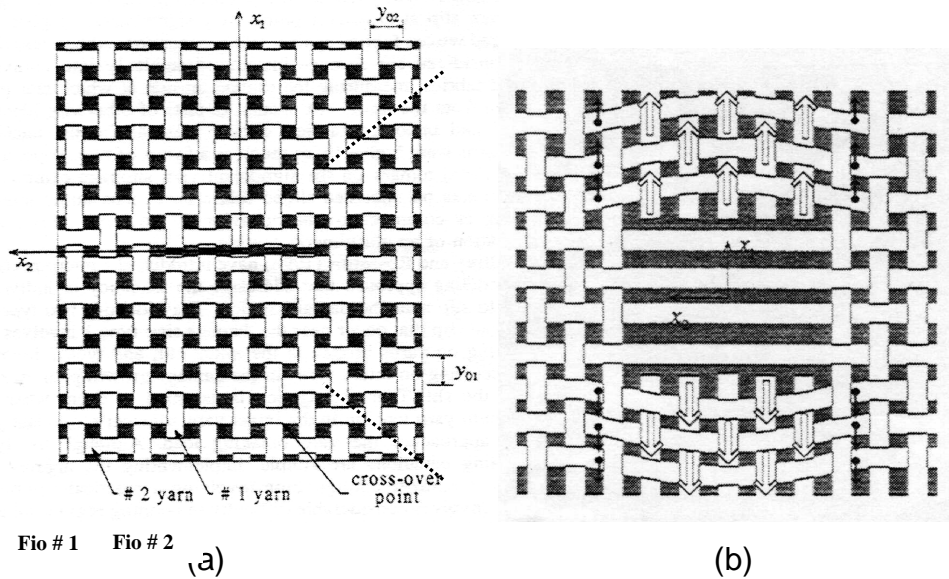


Figura 11: Desenho esquemático da ruptura em linha horizontal de fios (a), causando danos ao longo do eixo vertical (b). (Godfrey e Rossetos, 1999 b).

Neste tecido existe um dano associado à ruptura na mesma linha horizontal de fios verticais contínuos da figura 11 (a).

Em consequência desta ruptura, um plano biaxial de tensões atuando sobre o tecido produz um dano associado a aberturas ao longo do eixo vertical da trama, como esquematizado na figura 12.

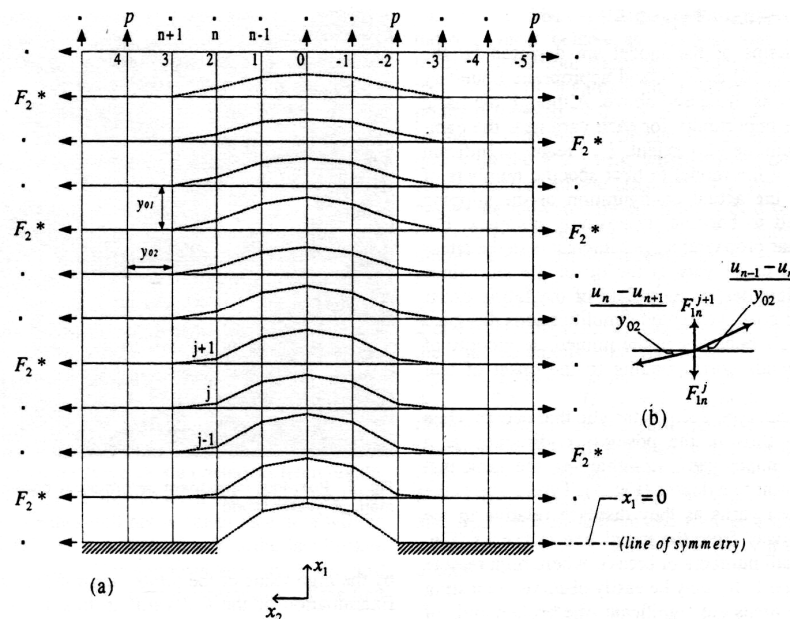


Figura 12: Simulação teórica do dano correspondente à figura 6, de acordo com o modelo de Godfrey e Rossetos, 1999.

Sob uma solicitação mecânica suficientemente elevada, um dano localizado como na Figura 11, se constitui no ponto inicial para a propagação de uma falha que acarrete esgarçamento da estrutura do tecido. Com base no modelo, Godfrey e Rossetos, (1999), chegaram a uma equação para o parâmetro  $\hat{p}_u$  adimensional que mede a tolerância ao dano da Figura 12.

$$\hat{p}_u = \frac{p_u}{f} \left( \frac{F_2^* y_{o1}}{EA y_{o2}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

onde  $\hat{p}_u$  é a carga de ruptura dos fios;  $f$  a força de fricção no cruzamento dos fios;  $F_2^*$  a solicitação mecânica dos fios horizontais;  $y_{o1}$  e  $y_{o2}$ , respectivamente, o espaçamento entre os fios horizontais e verticais da trama;  $E$  o módulo de elasticidade do fio e  $A$ , a área da seção reta do fio.

Utilizando conceitos da mecânica da fratura e o método de elementos finitos, Davidson et al, (2000) mediram a tenacidade de tecidos com trama retangular contendo pontos de ruptura como na Figura 11. Os autores concluíram que a tolerância ao dano é aparentemente independente do tamanho inicial da falha. Ou seja, o valor de  $\hat{p}_u$  na equação acima não dependeria do número de fios inicialmente rompidos.

## 2.7 - ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE TECIDO DE JUTA REFORÇANDO OUTRAS MATRIZES POLIMÉRICAS

Medeiros et al (2002) estudaram plásticos reforçados (compósitos) a base de resina fenólica reforçados por tecido híbrido de juta e algodão utilizando técnica de moldagem por compressão. Os resultados obtidos neste trabalho foram que os plásticos têm suas propriedades mecânicas melhoradas quando é adicionado algum tipo de reforço podendo ter um aumento significativo nestas e, portanto, podendo ser usado em novas aplicações tecnológicas. As propriedades mecânicas de impacto Izod dos compósitos fabricados neste trabalho aumentaram com o aumento do tecido.

Doan et al (2006) caracterizaram compósitos fibras de juta reforçando matriz

de polipropileno. Os autores concluíram que as propriedades de tensão das fibras de juta variam de acordo com a área de seção transversal e sua homogeneidade. As propriedades de tensão dos compósitos de matriz de polipropileno reforçados com fibras de juta melhoram com o aumento do teor de fibras.

Mohanty et al (2000) determinaram as propriedades mecânicas de compósitos com matriz de poliéster reforçados com tecido de juta. Verificou-se, neste trabalho uma melhora nas propriedades de resistência à tensão de compósitos contendo até 32% de tecido de juta. Valores acima deste causam diminuição das propriedades de tensão dos compósitos. Foi comprovado o potencial que o tecido de juta tem em reforçar compósitos de matriz polimérica.

Mohanty et al (2006), estudaram as propriedades dinâmico-mecânicas de compósitos com matriz de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de juta. A principal conclusão obtida pelos autores foi de que as fibras de juta podem, efetivamente, ser usadas como reforço de compósitos com matriz de polietileno de alta densidade, melhorando suas propriedades mecânicas.

Sendo assim, a juta tanto na forma de fibras quanto na forma de tecido constitui um ótimo reforço natural para compósitos não só de polietileno reciclado, como estudado neste trabalho, mas também com outras matrizes poliméricas.

## **2.8 - OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES**

Como foi apresentado neste capítulo de revisão bibliográfica, as fibras naturais lignocelulósicas vêm sendo cada vez mais valorizadas tanto por suas vantagens ambientais e econômicas como também por propriedades físicas e mecânicas. Estas vantagens já motivam o emprego de muitas fibras lignocelulósicas como reforço de compósitos poliméricos em diversas aplicações industriais, sobretudo no setor automobilístico. Uma destas fibras é a de juta, tradicionalmente utilizada em objetos de valor agregado relativamente baixo, mas com potencial para reforço de matriz polimérica de compósitos. Entre os usos tradicionais da fibra de juta destaca-se o tecido com fios de simples trama ortogonal, mundialmente utilizados em sacos de aniagem para guardar e transportar produtos a granel. Estes sacos quando danificados por esgarçamento da trama, ainda permitem que o tecido seja utilizado como reforço de compósitos. Caso a matriz do compósito seja um polímero residual, como o polietileno reciclado tem-se, juntamente com o tecido de juta reutilizado, um compósito de baixo custo com características ambientalmente

corretas. Entretanto, para que esse tipo de compósito possa ter interesse prático isto é, ser utilizados em componentes e peças industriais, é necessário conhecer suas propriedades e entender os efeitos que o dano nos tecidos de juta acarretam sobre o comportamento mecânico do compósito. A realização desta tese de doutorado foi motivada por estas observações e será apresentada nos capítulos seguintes.

## **CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS**

#### **3.1.1 - POLIETILENO**

O polímero utilizado como matriz dos compósitos foi o polietileno. Este polímero foi usado na condição de reciclado, como mostrado na figura 13, obtido na forma de pequenos pedaços catados por uma empresa de coleta do lixo no estado do Rio de Janeiro. Estes pedaços já estavam limpos e pouco contaminados com outros tipos de plástico. Não houve interesse em analisar as frações de polietilenos de alta e baixa densidades no material reciclado.



Figura 13. Polietileno reciclado utilizado como matriz dos compósitos produzidos neste trabalho.

#### **3.1.2 – TECIDO DE JUTA**

A juta foi utilizada na forma de tecido (malha trançada). Este tecido, incorporado como reforço dos compósitos, foi usado de duas maneiras:

- 1) Cortado diretamente de sacos de aniagem comuns que, após o uso, são descartados por supermercados, armazéns e etc, como pode ser visto na figura 14. Esses sacos possuem espaçamento de até, aproximadamente, 5 mm entre fios paralelos no entrelaçamento quadrado, mostrado na figura 14.
- 2) Tecido novo disponível no mercado, com espaçamento de, aproximadamente 1mm entre os fios paralelos, mostrado na figura 15.



Figura 14. Saco de aniagem descartado por supermercado cujo tecido será utilizado como reforço de compósitos



Figura 15. Tecido de juta novo disponível no mercado

### 3.2 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Placas de compósitos com aproximadamente 10 mm de espessura, que serviram como corpos de prova foram processados em moldagem por compressão a quente (165°C) utilizando molde (matriz) fechado, cujas dimensões são de 114x25x10 mm, e sob pressão de 1,7 MPa por, aproximadamente, 90 minutos. Uma fotografia da matriz utilizada pode ser vista na figura 16 (a) e uma outra fotografia da matriz separada da tampa pode ser vista na figura 16 (b).

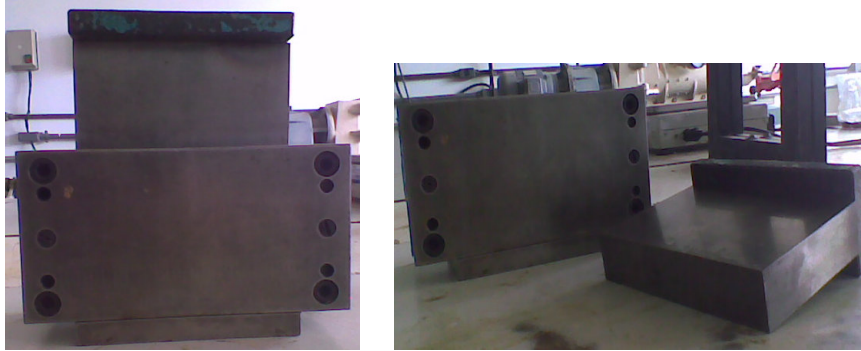


Figura 16: Matriz ou molde utilizado na confecção dos compósitos deste trabalho.

A obtenção da placa de compósito obedece a um procedimento experimental em duas etapas.

O procedimento teve início com a acomodação de camadas de tecido de juta entremeadas com polietileno, preenchendo o molde até a fração em peso desejada. A quantidade de tecido de juta variou de 0 a 30% em peso. Seguiu-se uma etapa de prensagem a quente da placa.

A figura 17 mostra a prensa e o forno utilizados para o processo de prensagem a quente.

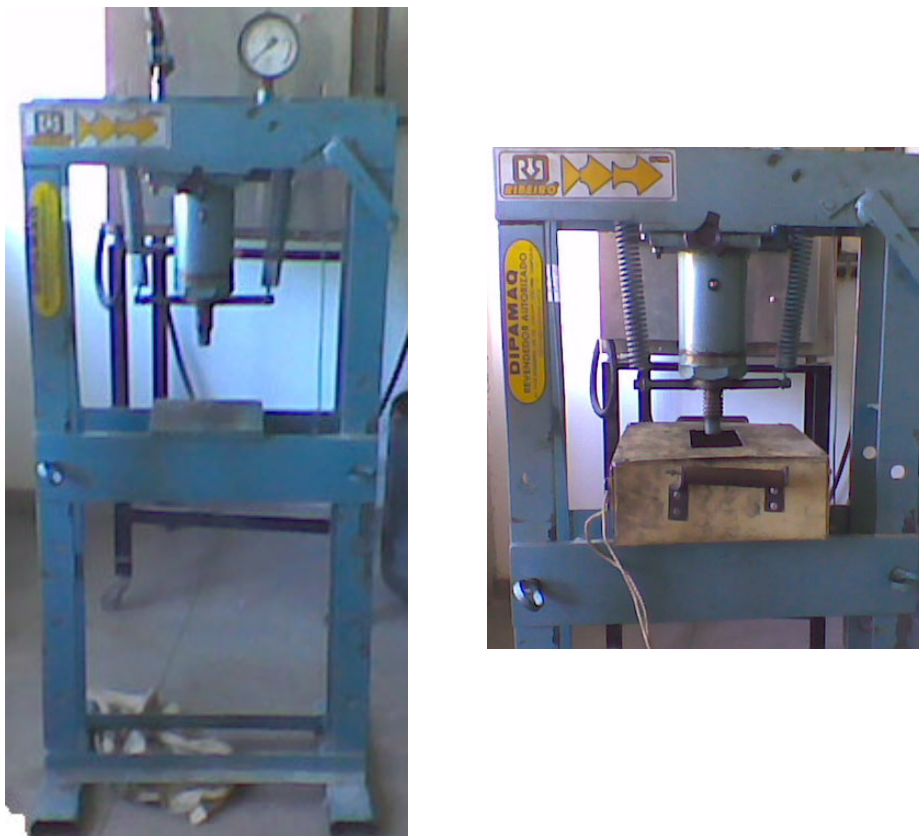


Figura 17: Prensa e forno utilizados na confecção dos compósitos.



Na figura 18 pode-se observar o compósito após ter passado por todas essas etapas de processamento.



Figura 18: Aspecto do compósito após o processamento.

### 3.3 – ENSAIOS MECÂNICOS

#### 3.3.1 – ENSAIO DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

Após o resfriamento, todos os corpos de prova foram ensaiados em flexão em três pontos em máquina Instron, modelo 5582 com 100kN de capacidade. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D-790, recomendada para plásticos. A relação de distância entre pontos de apoio para a espessura foi mantida em 9 e a velocidade de ensaio em 1mm/min.

Foram ensaiados 10 corpos de prova para cada porcentagem e condição do tecido de juta (tecido usado ou tecido novo), para que seja garantido um mínimo de precisão estatística.

A tensão de ruptura à flexão foi determinada a partir da relação:

$$\sigma_r = \frac{3F_{m\acute{a}x}L}{2le^2} \quad (3)$$

Onde:

- $\sigma_r$  = tensão de ruptura à flexão, em N/mm<sup>2</sup>
- $F_{m\acute{a}x}$  = carga de ruptura, em N
- $L$  = distância entre os centros de apoio, em mm

- e = espessura do corpo de prova, em mm
- l = largura do corpo de prova, em mm

### **3.3.2 - ENSAIO DE TRAÇÃO**

Com o objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas em tração do tecido do fio e da fibra de juta tanto novas quanto descartadas foram realizados os ensaios padronizados nos quais corpos de prova sofreram ruptura por tracionamento.

Para execução destes ensaios de tração foi utilizada uma máquina Emic modelo 1101, com pressão nas garras pneumáticas de 0,3 MPa , velocidade de 0,1 cm/min e capacidade de 100 kN. Os ensaios foram executados segundo os procedimentos recomendados pela norma ASTM D-2101. O ensaio foi realizado no tecido, no fio e na fibra que foi descartado por armazéns e ou supermercados e no tecido, fio e fibra novos.

### **3.3.3 - ENSAIO DE IMPACTO**

#### **3.3.3.1 – ENSAIO DE IMPACTO CHARPY**

Corpos de prova de compósitos específicos para ensaios de impacto com aproximadamente 10 mm de espessura foram processadas por compressão a 160°C em molde fechado e sob pressão de 1,7 MPa por 1h e 15 min. A quantidade relativa de tecido de juta, acomodada em camadas entremeadas com polietileno, variou de 0 (polietileno puro) a 30% em peso. As medidas dos corpos de prova compósitos foram de 120 x 12 x 10 mm exigidas pela norma ASTM D256 para a realização do ensaio de impacto Charpy.

Para a confecção do entalhe com 2,54 mm de profundidade e com um ângulo de 45° exigidos pela norma, foi utilizado um entalhador manual da marca CEAST mod. Notchugas. Os corpos de prova foram ensaiados em pêndulo instrumentado, em configuração Charpy, da marca CEAST, mod. Resil Impactor pertencente ao Instituto de Macromoléculas da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IMA/UFRJ, como pode ser vista na figura 19. A energia de impacto, dependendo do martelo utilizado, variou de 5,5 a 21,6 J.



Figura 19: Pêndulo utilizado para ensaios de impacto Charpy.

### **3.3.3.2. ENSAIO DE IMPACTO IZOD**

O objetivo do ensaio de impacto Izod é medir a susceptibilidade relativa de um corpo de prova padrão à carga de impacto de um martelo na extremidade de um pêndulo. Diferente do corpo de prova Charpy, o corpo de prova Izod é fixado à base do equipamento.

Para a realização deste ensaio, foram confeccionados corpos de prova de compósitos com aproximadamente 10 mm de espessura processadas por compressão a 160°C em molde fechado e sob pressão de 1,7 MPa por uma hora. A quantidade relativa de tecido de juta, acomodada em camadas entremeadas com polietileno, variou de 0 (polietileno puro) a 30% em peso de tecido.

As medidas dos corpos de prova foram de 60 x 12 x 10 mm exigidas pela norma ASTM D 256 - 84 para a realização do ensaio de impacto Izod, e o entalhe foi feito utilizando uma fresa de aço rápido. Os corpos de prova foram ensaiados em máquina EMIC pertencente ao Instituto de Química da UFRJ. Uma fotografia desta máquina pode ser vista na figura 20.

No ensaio, o corpo de prova foi inicialmente medido com um paquímetro digital, para especificação, e posteriormente fixado na base do equipamento para que este receba o impacto do martelo, registrando a energia necessária para ruptura

do corpo. Foram obtidos resultados de uma média de 10 corpos de prova ensaiados para cada porcentagem de tecido de juta.

Os resultados são expressos em termos de energia cinética (J/m) consumida pelo pêndulo para quebrar o corpo de prova. A energia requerida para quebrar o corpo de prova é a soma das energias necessárias para deformá-lo, para iniciar sua fratura, propagar a fratura através de sua secção transversal, e a energia para alcançar sua destruição final. A energia perdida através de fricção e vibração do aparelho deve ser mínima e geralmente desprezada.



Figura 20: Pêndulo utilizado para ensaio de impacto Izod.

### **3.4 - CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA**

A caracterização morfológica foi feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV), nos equipamentos como podem ser vistos na figura 21 (a) e (b). A preparação das amostras para MEV foi feita fixando o material com fita de carbono em suportes específicos. Em seguida as amostras foram metalizadas com ouro.

Foi feita uma análise morfológica da fibra de juta reciclada e nova através da microscopia eletrônica de varredura, MEV, a fim de se interpretar suas propriedades. Também foi analisado o polietileno utilizado como matriz dos compósitos fabricados. Todos os corpos de prova foram analisados microscopicamente após cada ensaiados mecânico estabelecendo, assim, uma comparação entre eles. Esta análise teve como objetivo a interpretação das propriedades do compósito.

As análises da fratura foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura, MEV, Jeol, mod. JSM-640 LV do Programa de Engenharia Metalúrgica

e de Materiais, PEMM/COPPE/UFRJ, figura 21 (a) e em um microscópio eletrônico de varredura, MEV, modelo Shimadzu SSX – 550 pertencente ao laboratório de materiais avançados-LAMAV, da UENF, figura 21 (b).

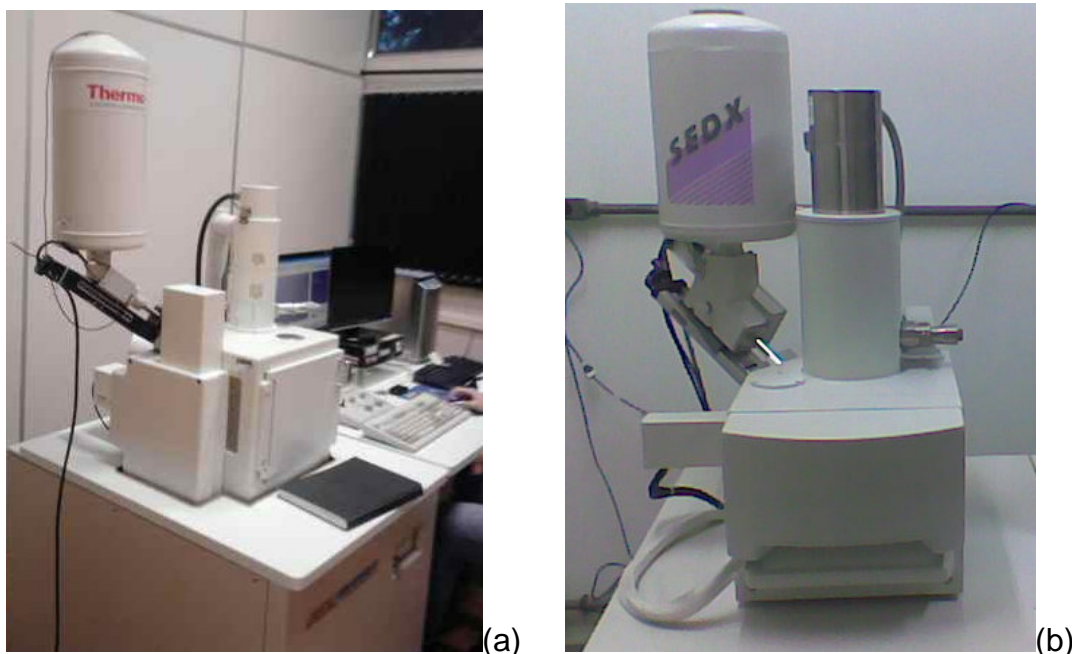


Figura 21: Microscópios eletrônicos de varredura utilizados para análises neste trabalho. (a) Jeol, mod. JSM-640 LV, (b) Shimadzu SSX – 550.

### 3.5 – ENSAIOS TÉRMICOS

#### 3.5.1 – ENSAIO DE DMA (DYNAMICAL MECHANICAL ANALYSIS)

O objetivo deste ensaio foi a determinação das propriedades viscoelásticas do compósito, bem como a interação fibra/matriz, através de uma análise termomecânica.

Na realidade, o ensaio de DMA constitui uma técnica muito completa no sentido de avaliação do comportamento dinâmico do material. É uma ferramenta muito utilizada na determinação de propriedades de compósitos reforçados com fibras naturais. Este tipo de análise tem sido amplamente utilizado para caracterizar polímeros através dos processos de relaxação viscoelástica, por apresentar maior sensibilidade quando comparada com técnicas convencionais de análise térmica, como DSC e TGA. A técnica de DMA permite não somente avaliar o comportamento viscoelástico como também determinar a região de transição vítrea de compósitos

poliméricos. O ensaio de DMA também fornece informações sobre o módulo elástico ou de armazenamento ( $E'$ ), o módulo de dissipação viscosa ou módulo de perda ( $E''$ ) e sobre o amortecimento mecânico ou atrito interno  $\tan \delta$  ( $\tan \delta = E''/E'$ ) de um material quando sujeito a uma solitação dinâmica. Esses parâmetros indicam o nível de interação dinâmica entre a matriz polimérica e a fibra que foi incorporada.

O equipamento utilizado foi o da TA Instruments Systems, pertencente ao SEPOL/LAMAV/UENF como mostrado na figura 22.



Figura 22: Equipamento da TA Instruments utilizado nos ensaios de DMA.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo dedicado aos resultados obtidos e correspondentes discussões, preliminarmente serão caracterizadas as matérias primas relacionadas com os sacos de juta em termos de fibras, fios e tecidos. Em seguida serão apresentados os resultados de tolerância ao dano no tecido baseado em um modelo matemático. Finalmente o desempenho dos compósitos e resultados associados à fratura serão apresentados e discutidos, bem como uma análise de custo benefício comparativa com materiais convencionais.

### 4.1 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO COMO REFORÇO DOS COMPÓSITOS – TECIDO DE JUTA

Inicialmente foram caracterizados os sacos de juta, novos e usados e então ensaiados à tração as fibras têxteis e os fios, formados por fibras retorcidas de juta bem como os tecidos de juta novos e usados.

#### 4.1.1 – ENSAIO DE TRAÇÃO DE TECIDO, FIO E FIBRA DE JUTA NOVO E USADO

A Figura 23 mostra exemplos de fios trançados que foram retirados diretamente dos tecidos dos sacos de aniagem de juta. Nesta figura nota-se que tanto os fios provenientes de um tecido novo, figura 23 (a), quanto aqueles de um tecido descartado, figura 23 (b), e conseqüentemente esgarçado, não diferem muito em sua aparência.

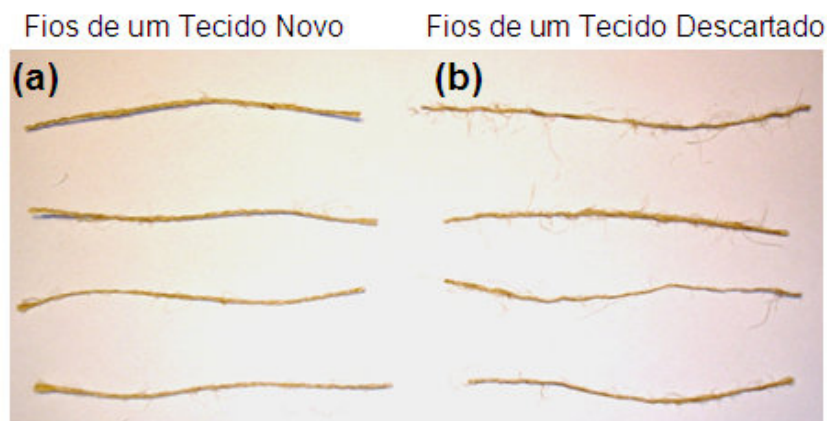


Figura 23: Exemplos de fios trançados de sacos de aniagem de juta (a) novos e (b) descartados.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração, correspondentes às médias de pelo menos 10 corpos de prova, estão apresentados na tabela 8. Vale aqui indicar que os corpos de prova dos tecidos eram quadrangulares com comprimento útil de 70 mm e seção reta com 25 x 1 mm. Os fios e fibras foram medidos individualmente e apresentaram diâmetros da ordem de 0,9 mm e 0,06 mm, respectivamente. Em ambos os casos o comprimento útil dos corpos de prova era de aproximadamente 30 mm.

Tabela 8: Resistência à tração e deformação máxima dos tecidos, fios e fibras de sacos de aniagem de juta.

<b>Corpos de prova obtidos de sacos de aniagem de juta</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Deformação total (%)</b>
<b>Tecido novo</b>	14,20 ± 2,94	6,0
<b>Tecido descartado</b>	4,58 ± 2,14	3,8
<b>Fio novo</b>	65,73 ± 9,98	12,3
<b>Fio descartado</b>	61,90 ± 8,65	7,2
<b>Fibra nova</b>	378,42 ± 99,03	7,8
<b>Fibra usada</b>	442,10 ± 123,79	6,5

Os valores apresentados na Tabela 8 foram convertidos em gráficos de resistência à tração vs. deformação total. Assim, a figura 24 apresenta a variação da resistência à tração dos tecidos com a deformação total. Nesta figura nota-se que o tecido retirado dos sacos de aniagem novos é bem mais resistentes, quase três vezes, que o dos sacos descartados. A principal razão para essa diferença é o fato de ser maior o número de fios nos tecidos novos. Na realidade, os corpos de prova de tecido novo apresentam, em média, dez fios verticais alinhados com o eixo de tração, enquanto que os corpos de prova do tecido descartado só possuem, em média, 5 fios.

Isto, em princípio, responderia por uma diferença de duas vezes na resistência para o tecido novo. Por outro lado, dois outros fatores poderiam



aumentar ainda mais esta diferença, para cerca de três vezes como experimentalmente obtido, Tabela 8 e figura 23.

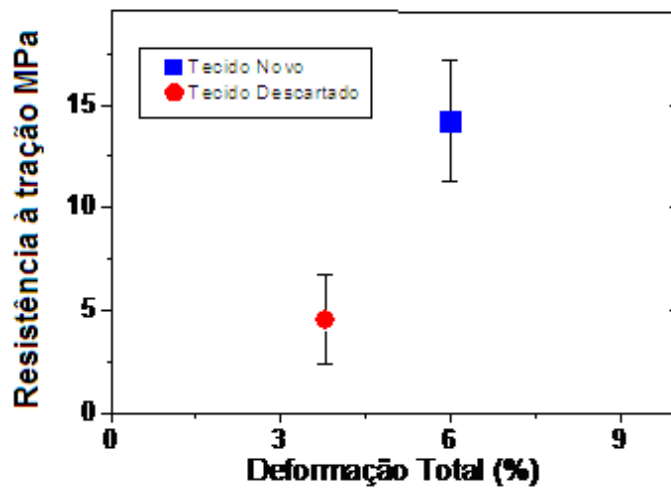


Figura 24: Variação da resistência à tração dos tecidos com a deformação total.

Um primeiro fator seria baseado no detalhe de que os fios do tecido descartado, por já serem usados, teriam menos resistência que os fios novos. Um segundo fator estaria relacionado à menor força de fricção no entrelaçamento dos fios da malha do tecido descartado, já que existiriam menos fios por área de tecido e, conseqüentemente, menos cruzamento entre fios. A figura 25 apresenta a variação da resistência à tração do fio, figura 25(a) e da fibra, figura 25(b) com a deformação total. Nesta figura observa-se não haver, dentro dos intervalos de erro, diferença nas resistências dos novos para os descartados.

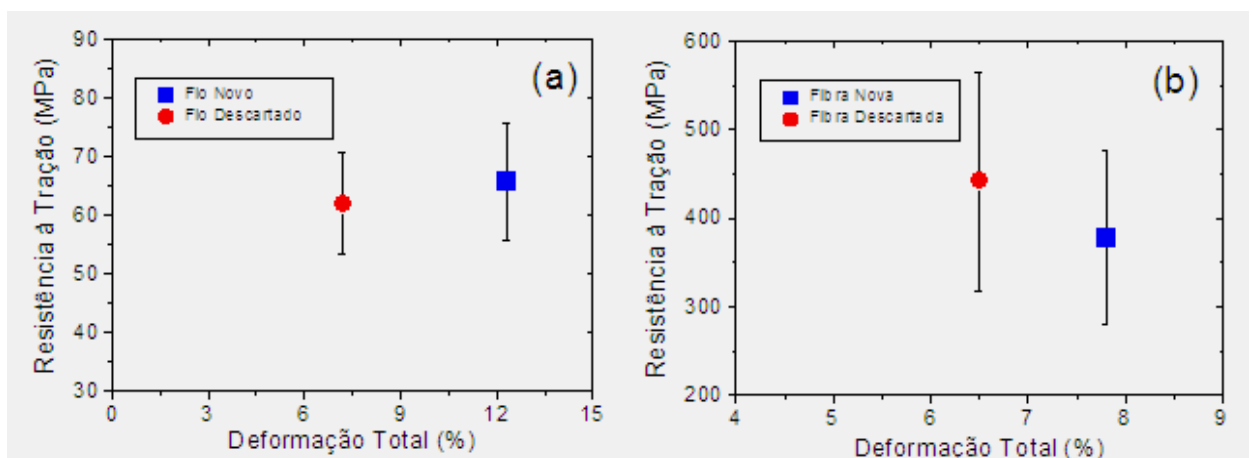


Figura 25: Variação da resistência à tração com a deformação total: (a) fios e (b)

fibras.

Ou seja, os fios, figura 25(a) e as fibras, figura 25(b), não tiveram suas resistências à tração afetadas pelo uso dos sacos de aniagem de juta até serem descartados. Houve sim, um decréscimo na capacidade de deformação dos mesmos, possivelmente devido ao processo de esgarçamento. Os resultados da figura 25 eliminam, pois, o primeiro fator sugerido para diminuir ainda mais a resistência dos fios e fibras descartados e assim justificar uma diferença de três vezes, mostrada na figura 25. Desta forma, além do maior número de fios, somente a maior força de fricção associada à maior quantidade de cruzamento de fios entrelaçados na malha também colabora para a resistência três vezes maior do tecido novo, comparativamente ao tecido descartado na figura 24.

#### **4.1.2 – CARACTERÍSTICAS DE FRATURA DE TECIDO DE JUTA NOVO E USADO: ESTUDO DO DANO**

O tecido de juta, por já ter sido usado, possui danos que, durante a solicitação mecânica do compósito, interferem com o comportamento mecânico. O efeito desses danos na trama do tecido será discutido a seguir.

##### **4.1.2.1 – MODELAMENTO MECÂNICO DE DANOS EM TECIDOS**

Danos em tecidos foram estudados através de um modelo matemático proposto por Godfrey e Rossetos (1999 b) que permite simular sua consequência sobre o comportamento mecânico do tecido. Embora o desenvolvimento do modelo esteja apresentado nos artigos referenciados, vale aqui enfatizar alguns pontos. O tecido modelado corresponde a uma trama quadrangular de fios que se atritam nos pontos de cruzamento, como indicado na figura 11. Neste tecido existe um dano associado à ruptura na mesma linha horizontal de alguns fios verticais contíguos, ao todo cinco no exemplo da figura 11(a).

Em consequência desta ruptura, um estado plano (biaxial) de tensões atuando sobre o tecido produz um dano associado a aberturas ao longo do eixo vertical da trama, como esquematicamente mostrado na figura 12.

Pode-se imaginar então que, sob ação de uma solicitação mecânica suficientemente elevada, um dano localizado como na figura 12, se constitui no ponto inicial para a propagação de uma falha que acarrete esgarçamento da

estrutura do tecido. Com base no modelo, Godfrey e Rossetos (1999) chegaram a uma equação para o parâmetro  $\hat{p}_u$  adimensional que mede a tolerância ao dano da figura 12.

$$\hat{p}_u = \frac{p_u}{f} \left( \frac{F_2^* y_{o1}}{EA y_{o2}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

onde  $p_u$  é a carga de ruptura dos fios;  $f$  a força de fricção no cruzamento dos fios;  $F_2^*$  a solitação mecânica dos fios horizontais;  $y_{o1}$  e  $y_{o2}$ , respectivamente, o espaçamento entre os fios horizontais e verticais da trama;  $E$  o módulo de elasticidade do fio e  $A$ , a área da seção reta do fio.

Utilizando conceitos da mecânica da fratura e o método de elementos finitos, Davidson et al. (2000) mediram a tenacidade de tecidos com trama retangular contendo pontos de ruptura como na figura 11. Os autores concluíram que a tolerância ao dano é aparentemente independente do tamanho inicial da falha. Ou seja, o valor de  $\hat{p}_u$  na equação (4) não dependeria do número de fios inicialmente rompidos.

O tecido de juta do saco de aniagem possui semelhança na trama com o modelo de Godfrey e Rossetos (1999 a, b, c) e se aplica como reforço de compósito segundo o conceito de Davidson et al (2000). Para uma avaliação experimental o tecido de juta utilizado como reforço de compósitos de matriz polietilênica foi cortado diretamente de sacos de aniagem, figura 26, tanto novos (a), como já usados (b).

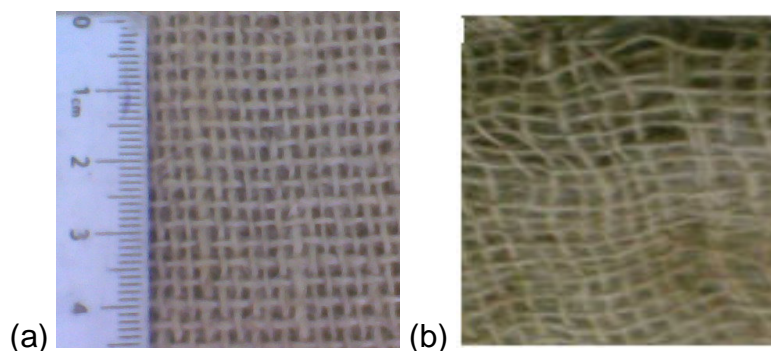


Figura 26: Parte dos sacos de juta com respectivas tramas: (a) novo; (b) usado.

A figura 27 apresenta amostras dos tecidos novos e usados com um dano associado a aberturas ao longo do eixo vertical da trama.

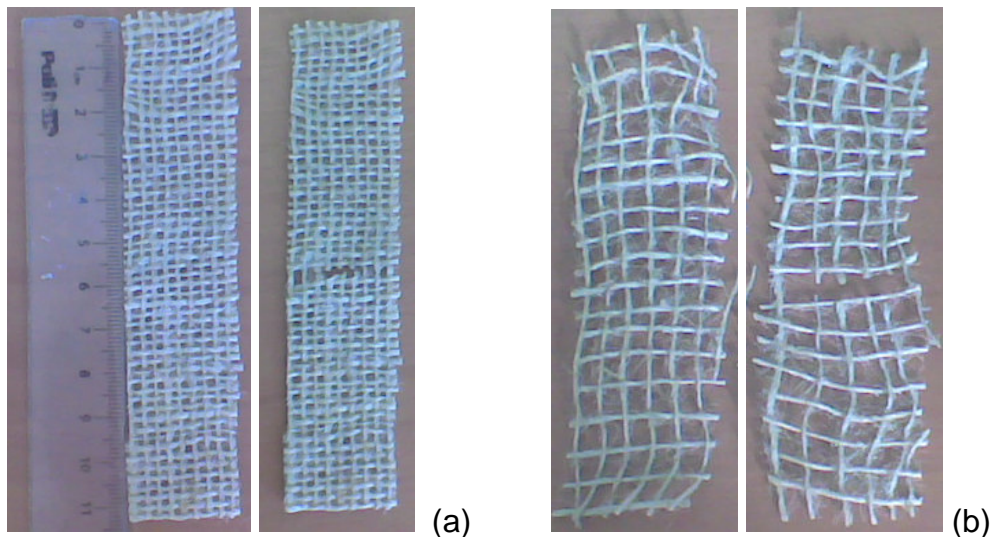


Figura 27: Amostras de tecidos novos (a) e usados (b) com danos associados na trama.

A Tabela 9 apresenta uma estimativa dos valores médios de alguns parâmetros correspondentes aos tecidos de juta, tanto o novo quanto o usado. Através dos valores listados nesta tabela foi possível, preliminarmente, utilizar-se dados que pudessem ser aplicados na equação (4). Assim, pode-se comparar a tolerância ao dano de compósitos fabricados com tecido novo em relação àqueles com tecido usado de juta.

Tabela 9: Parâmetros dos tecidos de juta.

Tecidos de juta	E (MPa)	A (mm <sup>2</sup> )	F <sub>2</sub> *	f	y <sub>01</sub>	y <sub>02</sub>	ρ <sub>u</sub>
Usado	390	0,246	7,40	0,033	2,0	5,5	96,7
Novo	457	0,196	6,64	0,033	1,5	1,5	151,5

Com os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 9, avaliou-se as respectivas tolerâncias ao dano dos compósitos reforçados com tecidos de juta usados e novos.

$$\hat{P}_u \text{ (tecido usado)} = 491 \quad (5)$$

$$\hat{P}_u \text{ (tecido novo)} = 1278 \quad (6)$$

Como esperado, estes resultados indicam que os compósitos reforçados com tecidos novos apresentam maior tolerância ao dano. Em parte, esta pode ser uma das razões dos compósitos reforçados com tecidos novos apresentarem maior resistência que os correspondentes com tecidos usados, como será mostrado posteriormente com ensaios mecânicos.

Existem evidências de que os fios do tecido estão bem aderidos à matriz de polietileno, tanto no caso do tecido novo quanto do usado. Além disso, em ambos os casos, a trama dos tecidos dificulta a propagação de trincas através da matriz (Monteiro et al 2006). Uma consequência deste comportamento foi o fato dos corpos de prova reforçados com esses tecidos não sofrerem ruptura total em ensaios de flexão, como poderá ser constatado em resultados posteriores. Compósitos reforçados com tecido de juta usado são mais heterogêneos com relação à fratura que os reforçados com tecido de juta novo. Isso seria devido a existência dos danos pré-existentes na trama dos fios. Na região desses danos, de acordo com a teoria de Godfrey e Rossetos (1999 b), haveria maior susceptibilidade, ou seja, menor tolerância ao dano relativamente ao comportamento do compósito. O processo de ruptura tenderia a se concentrar nestas regiões do compósito onde, devido ao dano, o efeito de reforçamento promovido pelo tecido seria diminuído. Isto concentraria então a deformação e ali iniciaria a falha que resultaria na fratura do compósito. Esta diferença na uniformidade da característica da fratura coaduna-se com os valores encontrados nas equações (5) e (6) e suporta os resultados de que compósitos reforçados com tecido de juta novo possuem maior resistência à flexão que os correspondentes reforçados com tecido de juta usado.

#### **4.2 - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO COMO MATRIZ DOS COMPÓSITOS – POLIETILENO RECICLADO**

O polietileno reciclado na forma de pedaços foi utilizado como matriz dos compósitos fabricados neste trabalho. Verificou-se que esses pedaços já estavam

limpos e secos, sem sinais de contaminação com outros tipos de plásticos. Fotografias do polietileno reciclado podem ser vistas na figura 13.

### **4.3 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS COM MATRIZ DE POLIETILENO RECICLADO REFORÇADOS COM TECIDO DE JUTA NOVO E USADO**

#### **4.3.1 – ENSAIOS DE IMPACTO**

O ensaio de impacto é um dos primeiros e até hoje um dos ensaios mais empregados para o estudo de fratura em materiais. Constitui-se de um ensaio dinâmico utilizado principalmente para materiais utilizados em baixas temperaturas (Souza,1982).

O resultado do ensaio é uma medida da energia absorvida por um material quando na fratura. Os resultados são expressos em termos de energia cinética consumida pelo pêndulo para quebrar o corpo de prova. A energia requerida para quebrar o corpo de prova é soma das energias necessárias para deformá-lo, para iniciar sua fratura, propagar a fratura através de sua seção transversal, e a energia para alcançar sua destruição final. A energia perdida através de fricção e vibração do aparelho deve ser mínima e geralmente desprezada. Quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material àquela solicitação dinâmica (Souza, 1982)

##### **4.3.1.1 - ENSAIO DE IMPACTO CHARPY**

Este ensaio teve como objetivo um estudo da tenacidade ao impacto de compósitos de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta, com porcentagem em peso do tecido variando de 0 a 40%.

Este estudo se encaixa muito bem dentro da tendência de se produzir materiais ambientalmente corretos, pois faz uso de recursos renováveis como matéria-prima para a fabricação do compósito, isto é, polietileno reforçado com tecido de juta.

##### **4.3.1.1.1 – POLIETILENO RECICLADO / TECIDO DE JUTA NOVO**

O tecido de juta utilizado como reforço de compósitos de matriz de polietileno foi comprado e cortado no mesmo tamanho do molde empregado para fabricar os corpos de prova. A matriz dos compósitos constituía-se de polietileno reciclado.

A figura 28 apresenta a variação da energia de impacto Charpy em função da quantidade de tecido novo incorporado à matriz de polietileno reciclado dos compósitos.

Os resultados mostraram que a incorporação de tecido de juta nova na matriz de polietileno reciclado aumenta consideravelmente a tenacidade ao entalhe do compósito, medida pela energia de impacto Charpy. Este resultado já era esperado, uma vez que o reforço de fibras, tanto sintéticas Fu et al, (1999) quanto naturais Leão et al, (2000) aumenta a energia de impacto de compósitos com matriz polimérica.

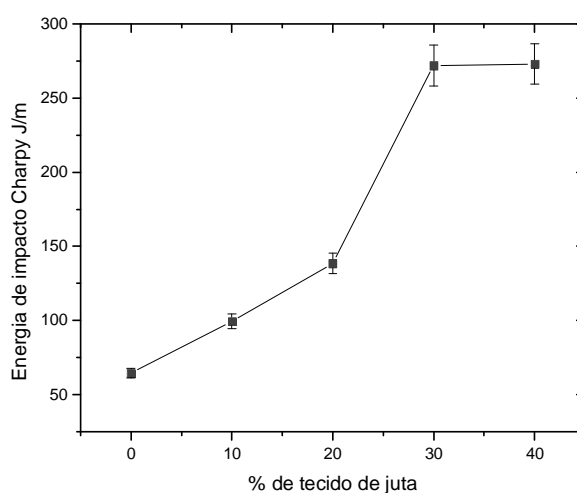


Figura 28: Energia de impacto Charpy em função da fração em peso de tecido de juta novo.

Um aumento relativamente maior na energia ocorre quando a porcentagem de tecido varia de 20 para 30%, passando a energia de 138,5 para 272,0 J/m. Esse aumento na tenacidade ao entalhe pode ser explicado devido à grande energia despendida em se dobrar as fibras que não conseguem ser rompidas dentro dos procedimentos do ensaio Charpy. Esse mesmo aumento de 10% no teor de tecido de juta não acarretou uma elevação tão significativa quando a porcentagem de tecido variou de 30 para 40%, fazendo a energia aumentar somente de 272,0 para 273,0 J/m. A figura 28 mostra o aspecto dos corpos de prova, com diferentes frações em peso do tecido de juta, logo após o ensaio por impacto Charpy.

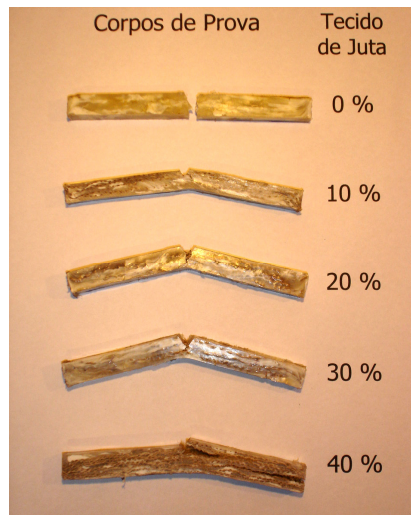


Figura 29: Aspecto dos corpos de prova rompidos por impacto Charpy.

Nota-se que somente o corpo de prova com 0% de juta, polietileno puro, rompeu-se completamente após ser ensaiado. O mesmo não ocorreu com os outros corpos de prova porque o tecido de juta “segura” a matriz de polietileno, impedindo que o compósito se rompa totalmente. Outro aspecto que pode ser observado nos corpos de prova reforçados com tecido de juta é que eles não se romperam de maneira totalmente transversal com o impacto do martelo Charpy. Os corpos de prova compósitos contendo tecido na porcentagem de 40% sofreram uma delaminação longitudinal e as fibras não se romperam, apenas se dobraram, tomando um formato em U.

#### 4.3.1.2 – ENSAIO DE IMPACTO IZOD

Assim como o ensaio de impacto Charpy, o ensaio de impacto Izod mede a susceptibilidade relativa de um corpo de prova padrão à carga de impacto de um peso na extremidade de um pêndulo. Entretanto, diferente do ensaio de impacto Charpy, o corpo de prova está fixo em uma de suas extremidades no caso do ensaio de impacto Izod.

##### 4.3.1.2.1 - POLIETILENO RECICLADO / TECIDO DE JUTA NOVO

A Figura 30 apresenta a variação da energia de impacto Izod com a quantidade de tecido de juta novo no compósito.



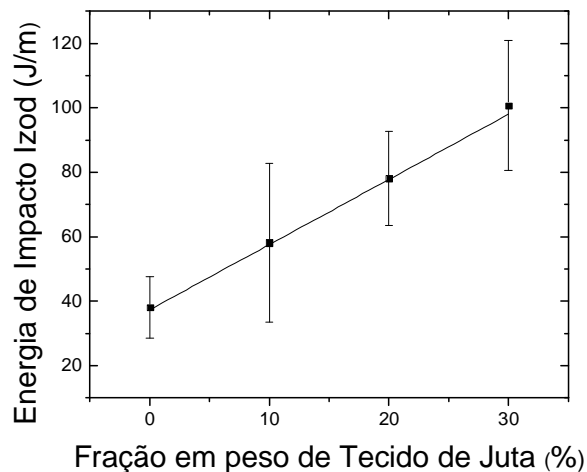


Figura 30: Energia de impacto Izod em função da fração em peso de tecido de juta novo

O gráfico da Figura 30 revela que a incorporação de tecido de juta na matriz de polietileno reciclado aumenta consideravelmente a tenacidade do compósito, medida pela energia de impacto Izod. Este resultado já era esperado, uma vez que o reforço de fibras, tanto sintéticas, Fu (1999), quanto naturais, Kumar (2005), aumenta a energia de impacto de compósitos com matriz polimérica. Os valores das energias de impacto obtidos pelo método Izod foram de, 38,00 J/m, 58,13 J/m, 78,10 J/m e 100,67 J/m para os corpos de prova com a porcentagem em peso de tecido de juta variando de entre 0, 10, 20 e 30%, respectivamente. A figura 31 mostra o aspecto dos corpos de prova, com diferentes frações em peso do tecido de juta, logo após o ensaio por impacto Izod.



Figura 31: Aspecto dos corpos de prova rompidos por impacto Izod.

Assim como no ensaio de impacto Charpy, as fibras que constituem o tecido de juta nova contribuem com o aumento da resistência dos compósitos, fazendo aumentar a energia de impacto Izod. Conseqüentemente, quanto maior for a quantidade de tecido de juta adicionado à matriz de polietileno, maior será a energia de impacto absorvida pelo compósito. Para 0% de tecido ocorre a ruptura total do corpo de prova. A partir de 10% em peso de tecido de juta já não há mais essa ruptura total, somente uma ruptura parcial do corpo de prova, pois a trinca é bloqueada pelo tecido e outras propagam-se longitudinalmente. Uma possível explicação para esse fato é a baixa resistência interfacial fibra/matriz é responsável por este comportamento.

#### 4.3.1.2.2 – POLIETILENO RECICLADO / TECIDO DE JUTA USADO

A Figura 32 apresenta a variação da energia de impacto Izod com a quantidade de tecido de juta usado no compósito.

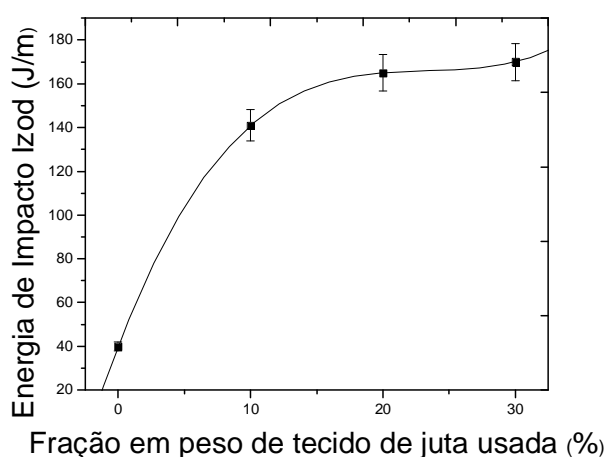


Figura 32: Energia de impacto Izod em função da fração em peso de tecido de juta usado.

Assim como o ensaio de impacto Izod realizado em compósitos com matriz de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo, os correspondentes reforçados com tecido de juta usado também apresentam um aumento nas propriedades de impacto.

É interessante notar que, dentro da margem de erro, o tecido usado, figura 32, comporta-se melhor como reforço de compósitos de polietileno reciclado do que o tecido novo, figura 31, relativamente aos ensaios de impacto Izod. Uma possível

explicação para este comportamento seria a relativamente maior heterogeneidade no trançado dos fios do tecido usado como será visto na análise estrutural por MEV. Esta heterogeneidade tenderia a produzir maior dispersão na trajetória da propagação das trincas durante o impacto. Um aumento nesta trajetória traduz-se em maior área rompida e conseqüentemente maior energia absorvida no impacto.

#### 4.3.2 - ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

A partir de um ensaio de flexão pode-se medir propriedades do material como módulo de ruptura, resistência máxima à flexão, módulo de elasticidade.

##### 4.3.2.1- COMPARAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE COMPÓSITOS COM MATRIZ DE POLIETILENO RECICLADO REFORÇADOS COM TECIDO DE JUTA NOVO E USADO

A Figura 33 exemplifica o aspecto de algumas curvas típicas de carga vs. extensão obtidas de ensaios de flexão em corpos de prova com diferentes frações em peso de tecido de juta. Vale comentar que todas as curvas de flexão, inclusive a correspondente ao polietileno puro, apresentaram alguma extensão plástica antes de ser atingida a carga máxima de resistência do material.

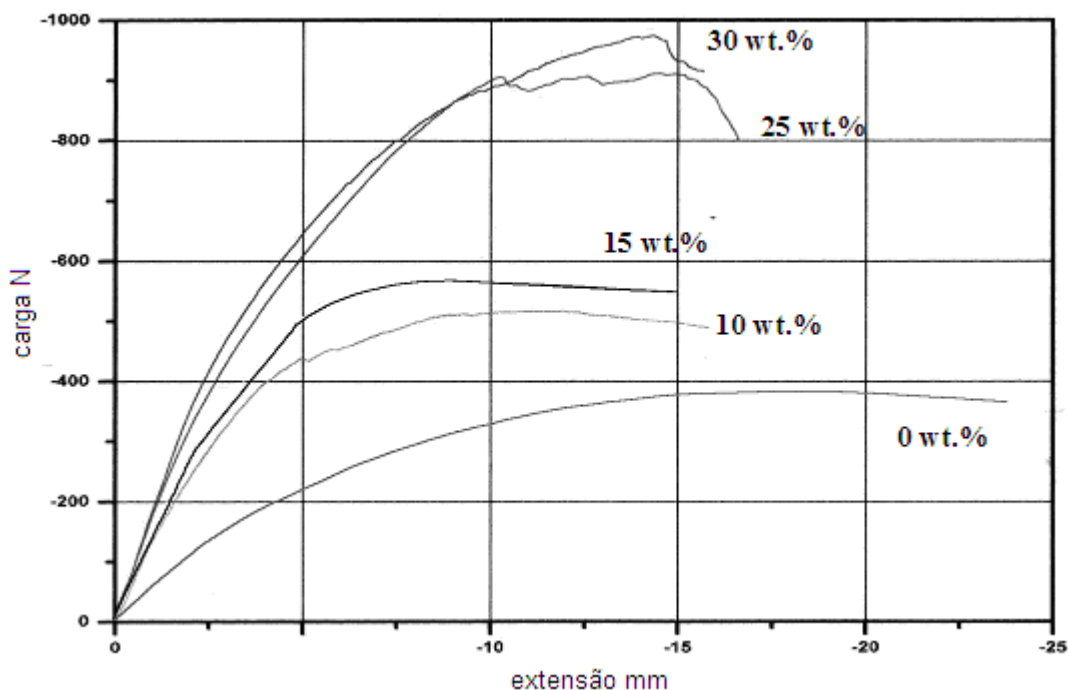


Figura 33: Curvas de carga vs. extensão para compósitos com diferentes frações em peso de tecido de juta.

A extensão plástica dos compósitos indica que o tecido de juta acompanha, até certo ponto, a deformação da matriz de polietileno. Isto pode ser sinal de um razoável acoplamento entre a fibra e o polietileno.

A partir do valor da carga máxima de curvas como as da figura 33, calculou-se a resistência mecânica, também conhecida como modulo de ruptura à flexão, do compósito através da equação (3), apresentada no capítulo anterior de materiais e métodos.

Tendo em vista os valores conhecidos da geometria do corpo de prova e das condições de ensaio, a equação (3) simplifica-se para:

$$\sigma_r (MPa) = 54 \times 10^{-3} Q(N) \quad (7)$$

Baseado na Equação (3) e nos resultados de curvas como as da Figura 32, apresenta-se na Figura 33 como a variação da resistência à flexão dos compósitos com matriz de polietileno reciclado em função da quantidade em peso de tecido de juta usado e novo como reforço.

Foram feitos ensaios de flexão em três pontos nos compósitos reforçados com tecido de juta novo e tecido de sacos de aniagem descartados a fim de estabelecer uma comparação entre as propriedades mecânicas de ambos. A porcentagem de tecido de juta variou de 0 a 40% em peso.

A figura 34 apresenta o valor médio da resistência à flexão dos compósitos com diferentes frações em peso de tecido de juta. Observa-se que, a partir de 10% em peso, ambos compósitos, tanto os reforçados com tecidos novos quanto os com tecidos já usados, aumentam a resistência mecânica, comparativamente com o polietileno reciclado puro.

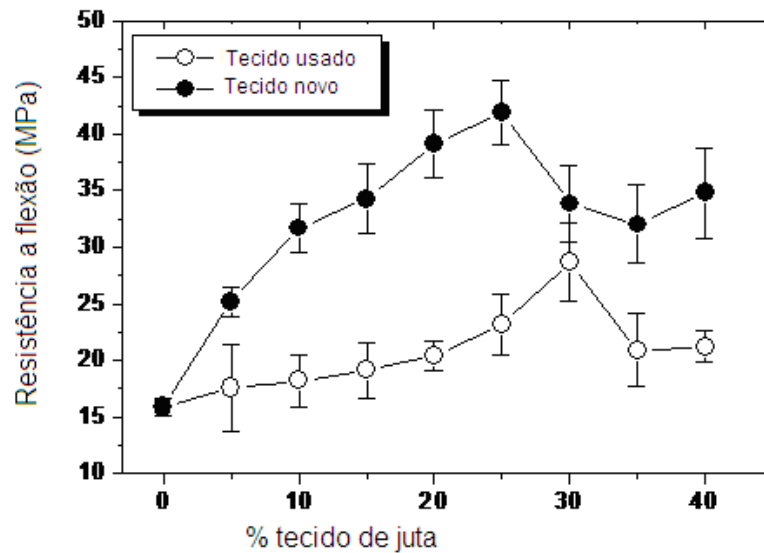


Figura 34: Variação da resistência à flexão do compósito em função da fração em peso de tecido de juta.

Variações nos valores da resistência à flexão estão aparentemente relacionadas com dificuldades em fabricar os compósitos. O preenchimento dos espaços na trama do tecido com o polietileno fluido a 160°C torna-se cada vez mais difícil para frações elevadas. Espaços vazios na matriz dos compósitos, em consequência da dificuldade de penetração da resina polimérica, acarretam porosidade que pode comprometer a resistência mecânica. Apesar disso, verifica-se que existe uma sensível diferença de maior resistência dos compósitos com tecidos novos, comparativamente aos correspondentes com tecido usado.

A tabela 10 mostra os valores associados aos valores máximos de resistência a flexão e o módulo de flexão obtidos de testes feitos com porcentagens diferentes de tecido de juta.

Tabela 10: Resistência à flexão e Módulo de flexão de compósitos de matriz de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo e usado.

<b>Porcentagem em peso de tecido de juta (%)</b>	<b>Resistência máxima a flexão de compósitos reforçados com tecido de juta novo (MPa)</b>	<b>Módulo de flexão do compósitos reforçados com tecido de juta novo (GPa)</b>	<b>Resistência máxima a flexão de compósitos reforçados com tecido de juta usado (MPa)</b>	<b>Módulo de flexão do compósitos reforçados com tecido de juta usado (GPa)</b>
0	15.89 ± 0.77	0.42 ± 0.03	15.89 ± 0.77	0.42 ± 0.03
5	25.17 ± 1.32	0.78 ± 0.13	17.57 ± 3.77	0.74 ± 0.15
10	31.69 ± 2.20	0.91 ± 0.07	18.22 ± 2.31	0.83 ± 0.12
15	34.25 ± 3.08	1.02 ± 0.10	19.17 ± 2.46	0.96 ± 0.13
20	39.11 ± 2.95	1.14 ± 0.17	20.39 ± 1.32	1.04 ± 0.08
25	41.92 ± 2.84	2.06 ± 0.18	23.13 ± 2.71	1.18 ± 0.14
30	33.85 ± 3.36	2.10 ± 0.17	28.66 ± 3.44	1.46 ± 0.15
35	32.01 ± 3.47	2.05 ± 0.15	20.90 ± 3.24	2.03 ± 0.18
40	34.80 ± 4.01	1.98 ± 0.21	21.21 ± 1.38	1.11 ± 0.16

A partir da tabela 10 pode-se observar que os valores da resistência máxima a flexão (15,89 MPa) e o módulo de flexão (0,42 GPa) (figura 35) obtidos para o polietileno puro nesta tese são comparados com os valores encontrados na literatura (Callister, 2004) para o polietileno de baixa densidade. Este fato indica que o polietileno reciclado utilizado neste trabalho tem suas propriedades mecânicas semelhantes à resina virgem.

Baseado nos dados da tabela 10 e na figura 34 observa-se uma variação da resistência à flexão dos compósitos de polietileno com a quantidade, tanto de tecido de juta novo quanto de tecido usado retirado de sacos de aniagem. Levando em consideração as barras de erros, existe uma diferença entre eles. Esta diferença pode ser devido aos danos existentes no tecido usado, como proposto no modelamento matemático de Godfrey e Rossetos e nos valores das equações (5) e (6).

A figura 35 mostra um gráfico referente ao módulo de flexão dos compósitos poliméricos deste trabalho reforçados com tecido de juta novo e usado. A variação

do módulo de flexão na figura 35 acompanha a variação da resistência à flexão na figura 34. Assim a mesma discussão se aplica para as diferenças encontradas no módulo de flexão dos compósitos com tecido novo em relação aos compósitos com tecido usado de juta.

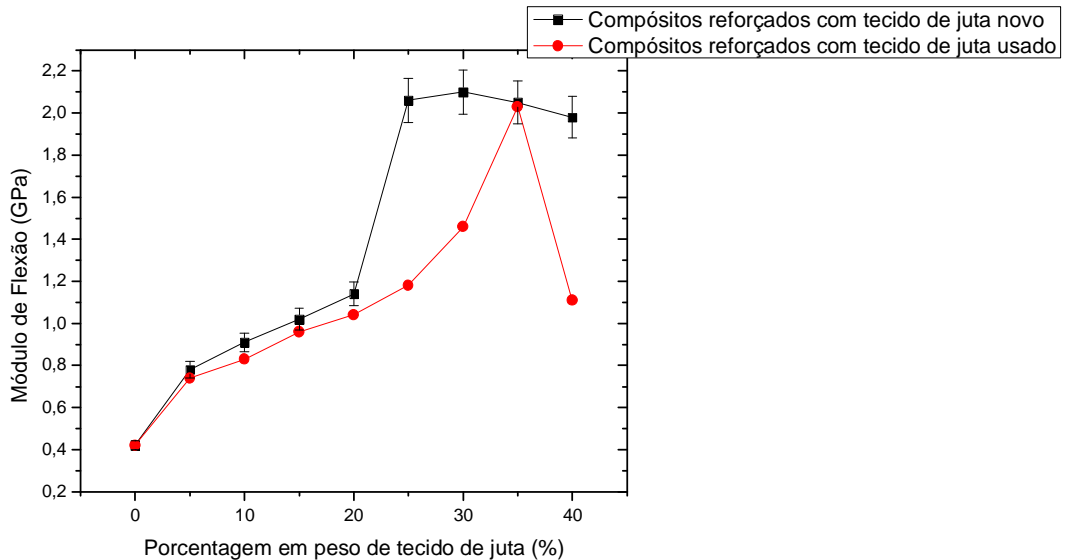


Figura 35: Comparação do módulo de flexão de compósitos de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo e usado.

#### 4.4 – CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

A técnica de avaliação dinâmico-mecânica através de ensaios de DMA (análise dinâmico-mecânica) vem sendo utilizada cada vez para a determinação de propriedades de compósitos reforçados com fibras naturais (Ray et al 2002 e Mohanty et al 2006). Este tipo de análise tem sido amplamente empregada para caracterizar polímeros através dos processos de relaxação viscoelástica, por apresentar maior sensibilidade quando comparada com técnicas convencionais de análise térmica, como DSC (Canaverolo 2003). A técnica de DMA permite não somente avaliar o comportamento viscoelástico como também determinar a região de transição vítrea de compósitos poliméricos como indicado por Monteiro et al (2008). O ensaio de DMA também fornece informações sobre o módulo viscoelástico ou de armazenamento ( $E'$ ), o módulo de dissipação viscosa ou módulo de perda ( $E''$ ) e sobre o amortecimento mecânico ou atrito interno  $\tan \delta$  ( $\tan \delta = E''/E'$ ) de um material quando sujeito a uma solicitação dinâmica e oscilatória. Os parâmetros

analisados por DMA indicam o nível de interação dinâmica entre a matriz polimérica e a fibra que foi incorporada. Muitos estudos de DMA já foram realizados com compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas (Kubat et al 1990, Bikiaris et al 2001, Vajrasthira et al 2003).

#### **4.4.1 – DMA (ANÁLISE DINÂMICO MECÂNICA)**

A Figura 36 ilustra conjuntos de curvas dos parâmetros dinâmico-mecânicos obtidos em função da temperatura para compósitos de polietileno reciclado, incorporados com 0, 10, 20 e 30% em peso de tecido de juta. Nesta figura, observam-se picos referentes à variação desses parâmetros com a temperatura. O pico na curva da  $\tan \delta$  corresponde ao limite superior desta transição, normalmente identificado como a temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , da matriz. Maiores detalhes sobre os picos e as características de transição serão vistos a seguir nos conjuntos separados de todas as curvas para  $E'$ ,  $E''$  e  $\tan \delta$  correspondentes aos compósitos com diferentes frações de tecido de juta e também do polietileno puro, isto é, 0% de fibra.

A Figura 36 apresenta o conjunto de curvas da variação do módulo de armazenamento,  $E'$ , com a temperatura para os compósitos de polietileno reciclado incorporados com diferentes frações de tecido usado de juta, juntamente com a curva do polietileno reciclado puro. É importante lembrar que o valor de  $E'$  está diretamente relacionado com a rigidez viscoelástica do material (Mohanty et al 2006). Neste ensaio, isto corresponde à capacidade do compósito suportar cargas dinâmicas com deformação recuperável.



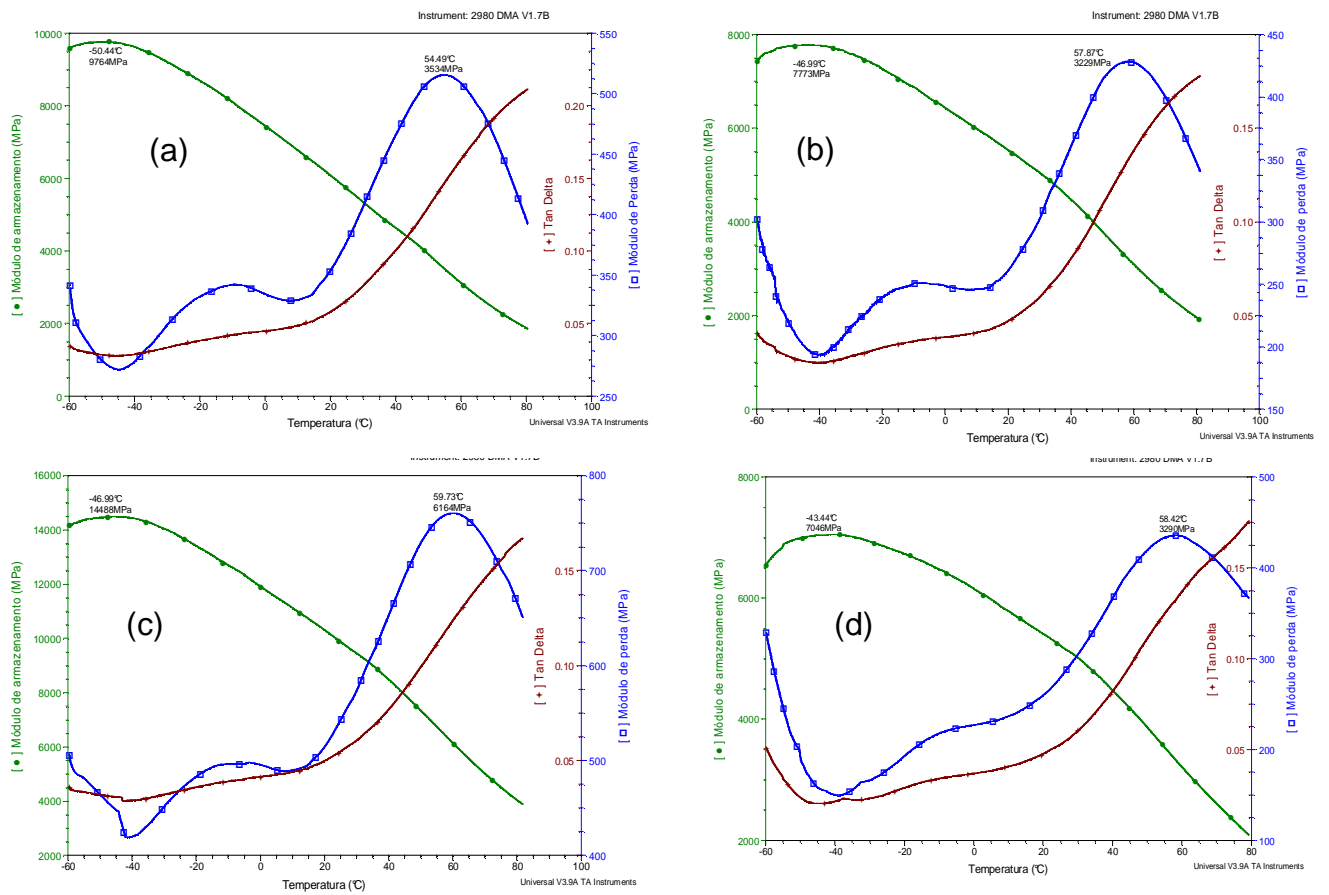


Figura 36: Curvas de DMA mostrando a variação dos parâmetros dinâmico-mecânicos com a temperatura para compósitos com (a) 0, (b) 10, (c) 20 e (d) 30% em peso de tecido de juta.

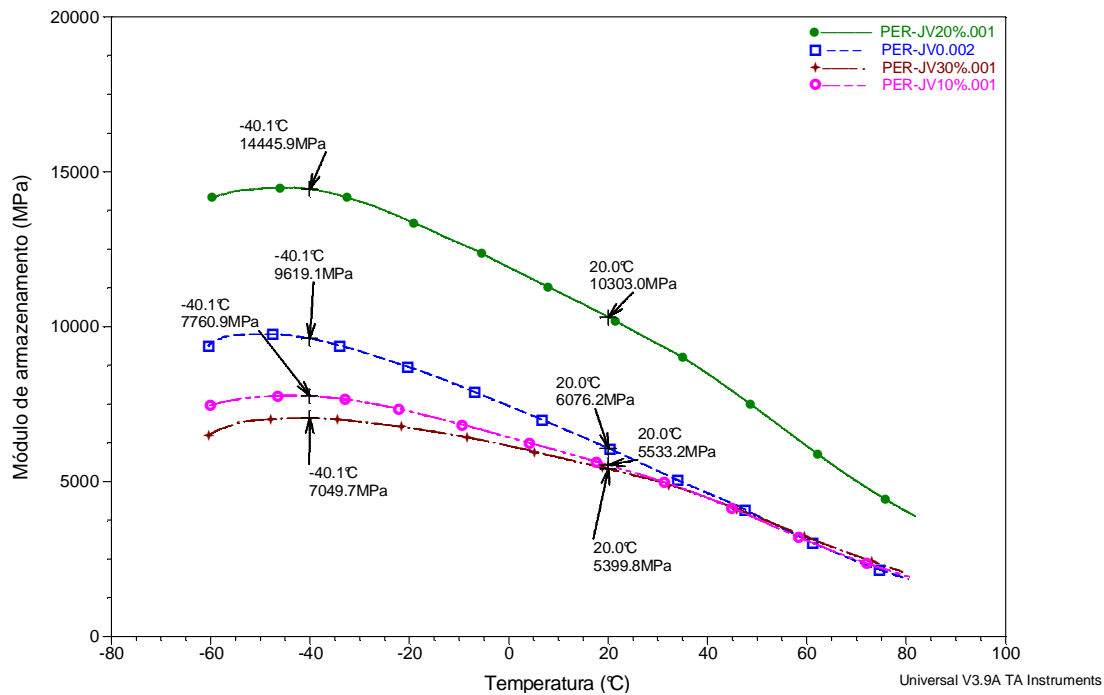


Figura 37: Curvas de DMA da variação do módulo de armazenamento,  $E'$ , com a temperatura para compósitos de polietileno reciclado incorporado com diferentes frações de tecido usado de juta bem como para o polietileno reciclado sem incorporação, 0%.

As curvas da Figura 37 mostram que em todo o intervalo de temperatura, -60 a 80°C, o compósito com 20% em volume de tecido usado de juta apresenta o maior valor de  $E'$ . Uma diferença marcante existe deste valor comparativamente aos das outras curvas. Por exemplo, na temperatura de 20°C na figura 36, o compósito com 20% de tecido de juta, possui  $E' = 10,30$  GPa, comparativamente bem superior ao do polietileno reciclado puro, com  $E' = 6,08$  GPa. Na verdade, os outros dois compósitos, 10% e 30%, apresentam ao longo de todas as suas curvas, módulos de armazenamento bem próximos e, ambos, pouco inferiores aos do polietileno reciclado. Embora pareçam surpreendentes, estes resultados encontram um paralelo em outros obtidos com os mesmos compósitos ensaiados em flexão quase-estática (Lima et al 2008). Devido a danos nos tecidos de juta associados à baixa resistência interfacial fibra/matriz, ocorre uma tendência de reforço da matriz de polietileno reciclado por volta de 20% de tecido usado de juta.

A figura 38 apresenta o conjunto de curvas da variação do módulo de perda,  $E''$ , com a temperatura para os compósitos incorporados com diferentes frações de

tecido usado de juta juntamente com a curva do polietileno reciclado puro. Todas curvas desta figura passam por um máximo entre 54 e 59°C. Esse máximo na curva de  $E''$  corresponde ao chamado pico  $\alpha$  de relaxação. Segundo Mohanty et al. (2006), a relaxação estrutural que acarreta o pico  $\alpha$  pode ser atribuída à mobilidade das cadeias na fase cristalina do polímero da matriz devido à reorientação de defeitos.

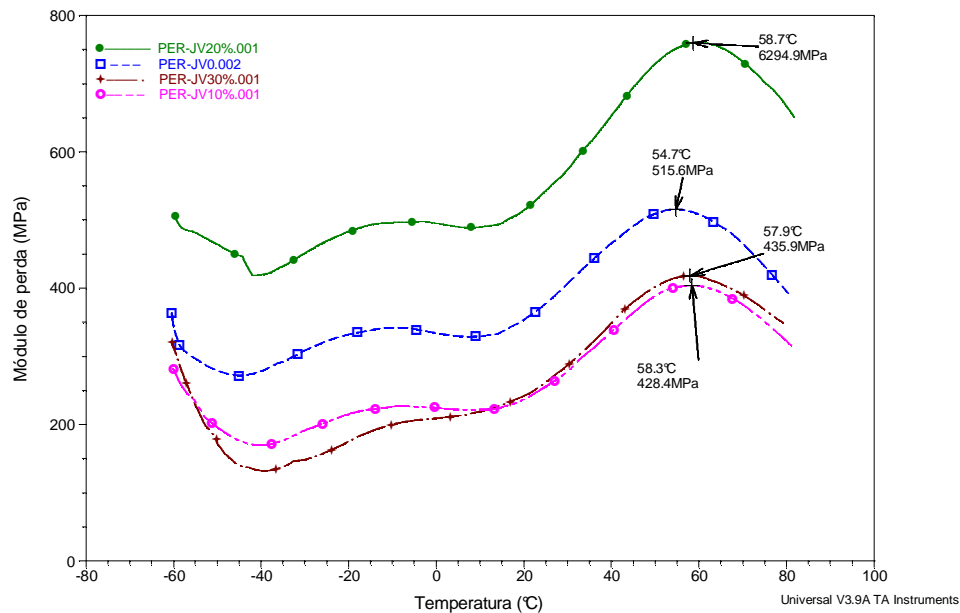


Figura 38: Curvas de DMA da variação do módulo de perda,  $E''$ , com a temperatura para compósitos de polietileno reciclado incorporado com diferentes frações de tecido usado de juta bem como para o polietileno reciclado sem incorporação.

As curvas da figura 38 são semelhantes às da figura 37 pelo fato dos valores do módulo de perda em todo o intervalo de temperaturas investigado apresentarem nítida predominância do compósito com 20% de tecido de juta, seguido do polietileno e depois dos compósitos de 10 e 30%, com valores praticamente iguais. Estes resultados reafirmam o fato de que somente acontece um efetivo reforço da matriz de polietileno reciclado para a incorporação de 20% de tecido de juta usado. Quantidades menores, 10%, ou maiores, 30%, reduzem tanto a rigidez viscoelástica ( $E'$ ) quanto a viscosa ( $E''$ ) dos compósitos comparativamente ao polietileno reciclado puro. Ainda em relação à figura 38, vale também comentar que existe um ligeiro deslocamento dos picos dos compósitos, de cerca de 3°C, para temperaturas mais altas em relação ao do polietileno reciclado puro. Isto sugere uma pequena redução

da mobilidade das cadeias de polietileno da matriz devido à interação das fibras de juta no tecido com as macromoléculas do polietileno (Machado et al 2002).

A figura 39 apresenta o conjunto de curvas da variação da tangente  $\delta$  com a temperatura para os compósitos incorporados com diferentes frações de tecido usado de juta, juntamente com a curva do polietileno reciclado puro. É importante observar que, no intervalo de temperatura investigado, até 80°C, não foi possível atingir o ponto máximo nas curvas de  $\tan \delta$ . Este máximo deve estar em torno de 90°C e permitiria caracterizar o limite superior da transição do estado cristalino para o amorfo que identifica a temperatura de transição vítrea,  $T_g$ . Ainda assim é possível verificar que, de -40 até 80°C, o polietileno reciclado apresenta significativamente maior valor de  $\tan \delta$  que todos os compósitos. Inclusive o compósito com 20% de tecido de juta, isto é, o material que na figura 39 possui o menor valor de  $\tan \delta$  acima de 30°C. A razão para se ter limitado os ensaios de DMA a um intervalo de temperatura até 80°C foi devido à temperatura de fusão do polietileno ser da ordem de 100°C.

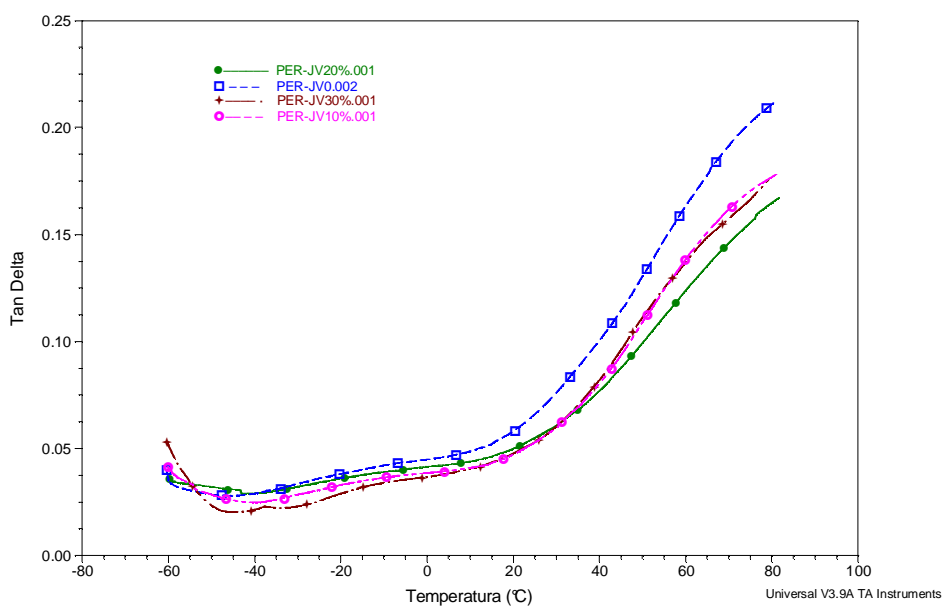


Figura 39: Curvas de DMA da variação da tangente  $\delta$  com a temperatura para compósitos de polietileno reciclado incorporado com diferentes frações de tecido de juta bem como para o polietileno reciclado sem incorporação.

Uma vez que a  $\tan \delta$  está relacionada com o amortecimento ou atrito interno da estrutura polimérica Canaverolo (2003), é natural que o polietileno puro apresente o maior amortecimento estrutural. Entretanto, com a introdução dos tecidos

usados, a interação das fibras de juta com as cadeias moleculares da matriz reduz a capacidade de amortecimento do compósito. A explicação para este fato foi apresentada em outras publicações Monteiro et al (2008) e Felix (1991). O decréscimo no amortecimento, isto é, na amplitude da  $\tan \delta$ , para os compósitos seria consequência das fibras de juta no tecido suportarem parcialmente a tensão aplicada sobre a matriz do compósito. Isto permitiria que parte dessa tensão deformasse também a interface fibra/matriz (Felix, 1991).

#### 4.5 – ANÁLISE ESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

##### 4.5.1 – CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE FIBRAS E FIOS

Observações por MEV da microestrutura dos fios e fibras complementam os resultados até agora obtidos e ajudam na discussão deste assunto. A figura 40 mostra feixes de fibras novas e descartadas. Nesta figura não existem aspectos que possam evidenciar sensíveis diferenças entre as fibras.

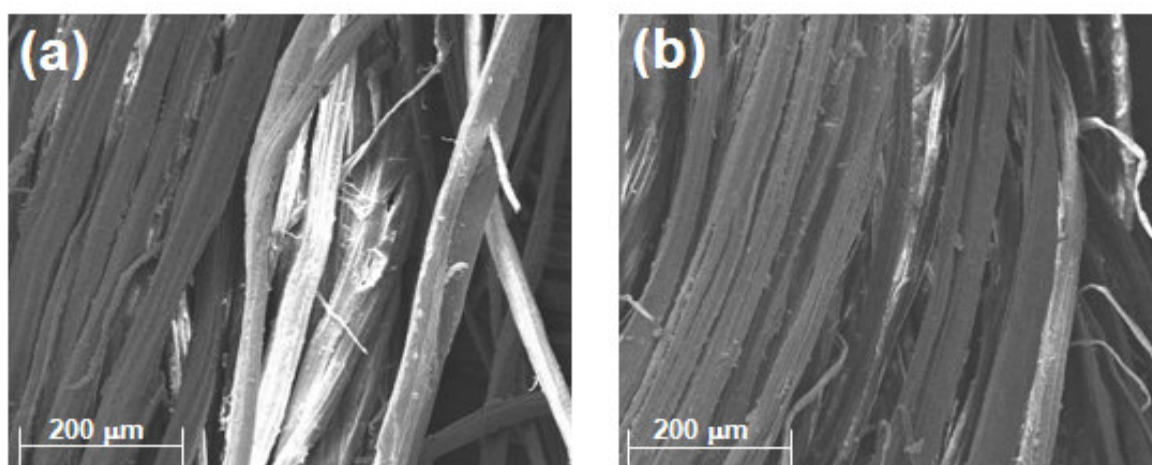
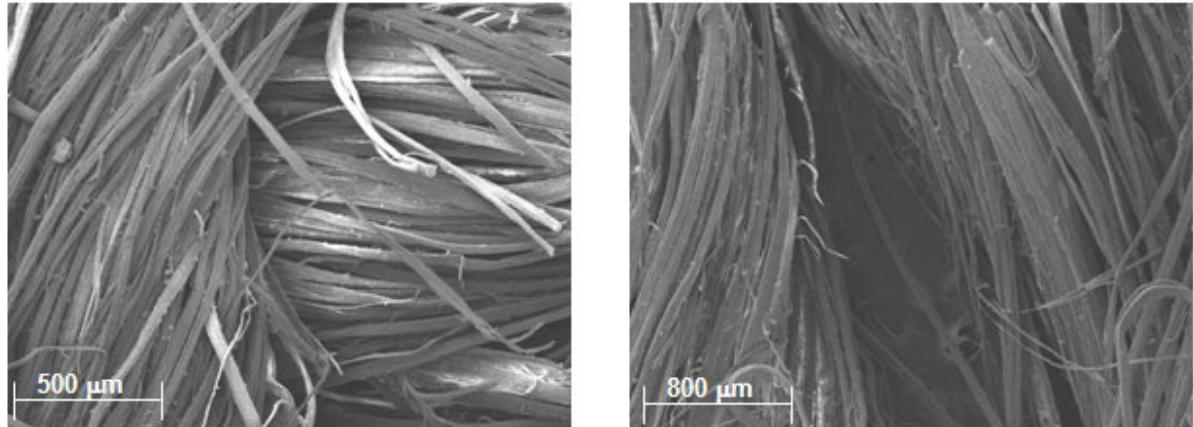


Figura 40: Micrografia por MEV de feixes de fibras: (a) novas e (b) descartadas.

Com base na figura 40, sugere-se que o fato de se usar sacos de aniagem de juta até o seu tecido esgarçar, ocasionando seu descarte, não afeta a aparência microscópica das fibras de juta. Isto corrobora os resultados obtidos para a resistência à tração das fibras nos quais, estatisticamente, não existem diferenças entre as fibras novas e descartadas.

A figura 41 apresenta micrografias por MEV de fios compostos pelo

entrelaçamento de fibras. Aqui também não existem diferenças marcantes entre um fio novo em um descartado. No entanto, no caso do tecido novo, o cruzamento entre dois fios perpendiculares, figura 41 (a), na malha é bem ajusta figura 41(b), na malha em consequência do esgarçamento.do, sem deixar espaços livres. Por outro lado, os fios no tecido descartado deixam espaços abertos, figura 41 (a), na malha em



conseqüência do esgarçamento.

Figura 41: Micrografia por MEV de fios formados por fibras entrelaçadas: (a) novos (b) descartados

É relevante enfatizar que os resultados deste ensaio mecânico de tração mostram que a principal razão para se ter o grande decréscimo na resistência à tração dos tecidos descartados em relação aos novos de sacos de aniagem de juta é o esgarçamento causado pela separação dos fios. Este esgarçamento não afeta a resistência tanto dos fios quanto das fibras a não ser por diminuir a deformação. Desta forma, para uma mesma quantidade em volume de tecido descartado, não deverá haver diferença comparativa, relativamente ao tecido novo, para servir de reforço em compósitos poliméricos.

#### 4.5.2 – FRATURA DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

As análises da superfície de fratura de fios e fibra tanto novos quanto usados submetidos a ensaio de tração podem ser observadas nas figuras que seguem. Na figura 42 é mostrado o aspecto da superfície de fratura de uma fibra de juta nova que foi tracionada.

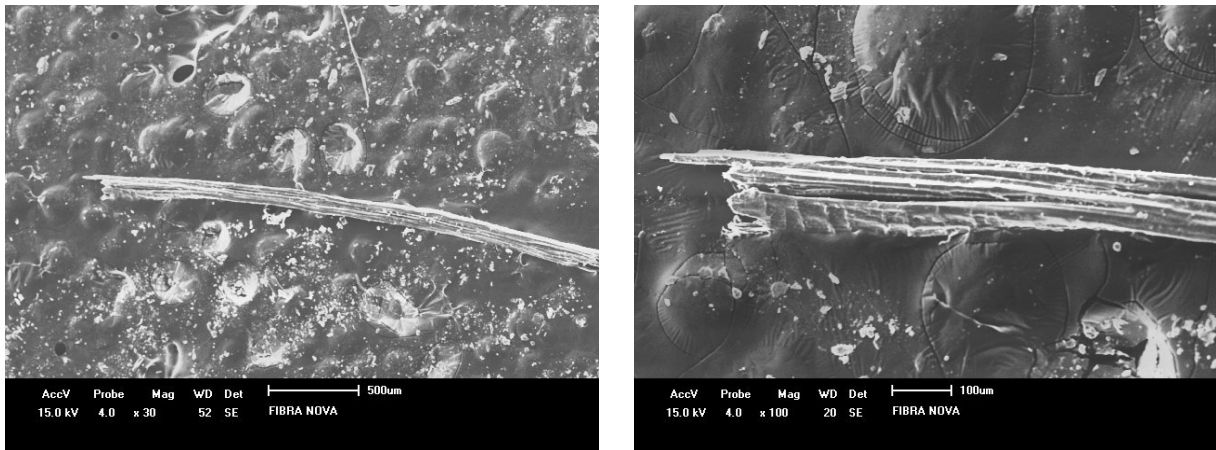


Figura 42: Fratura de uma fibra de juta nova.

Pode-se observar, de acordo com a figura 42, que uma fibra proveniente de um tecido de juta novo apresenta uma fratura uniforme, ou seja, as microfibrilas que compõem uma fibra se rompem praticamente de uma só vez. Esse fato ainda pode ser complementado no sentido de que o tecido, por ser novo, ainda não sofreu nenhum tipo de esgarçamento.

A figura 43 apresenta o aspecto da superfície de fratura de uma fibra de juta usada que foi submetida a um ensaio de tração. Observa-se que sua superfície de fratura não é tão uniforme quanto a nova na figura 42. As microfibrilas não se rompem de uma só vez, mas cada uma de acordo com a tensão de tração máxima que suporta. Esse fato pode ser explicado considerando-se que o tecido de onde a fibra foi retirada já se encontrava muito esgarçado e imprestável para fins comerciais, apresentado, assim muitas microfibrilas já rompidas antes do ensaio de tração.

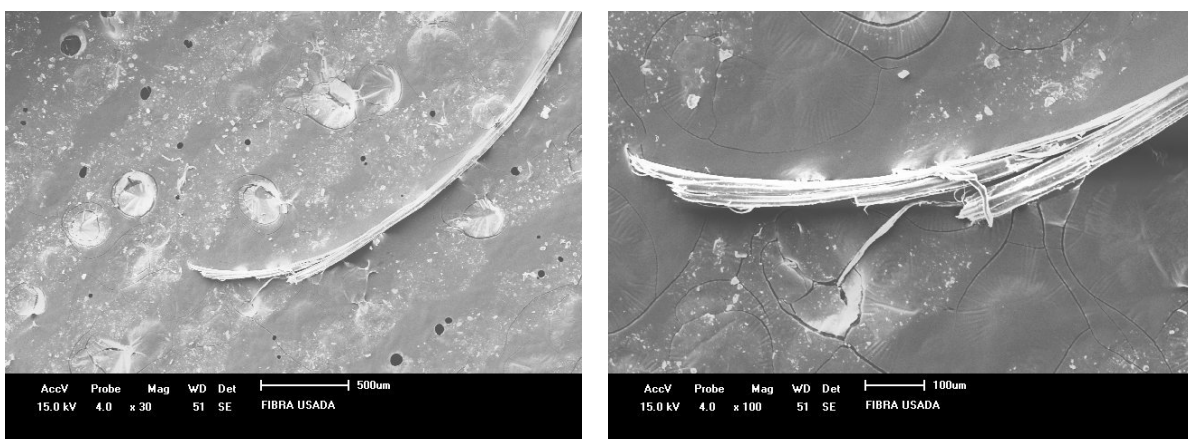


Figura 43: Fratura de uma fibra de juta usada.

Como complemento à fratura das fibras novas e usadas, serão apresentadas micrografias de fio novo e usado retirados de tecido de juta.

As figuras 44 e 45 apresentam, respectivamente, as superfícies de fratura referentes um fio de juta novo e um fio de juta usada que foram submetidos a um ensaio de tração. A partir das micrografias da figura 44 e 45 é possível dizer que o fato de, assim como a fibra nova e usada, os fios nas mesmas condições apresentarem uma fratura homogênea e não homogênea, respectivamente, possui a mesma explicação para a fratura da fibra nova e usada.

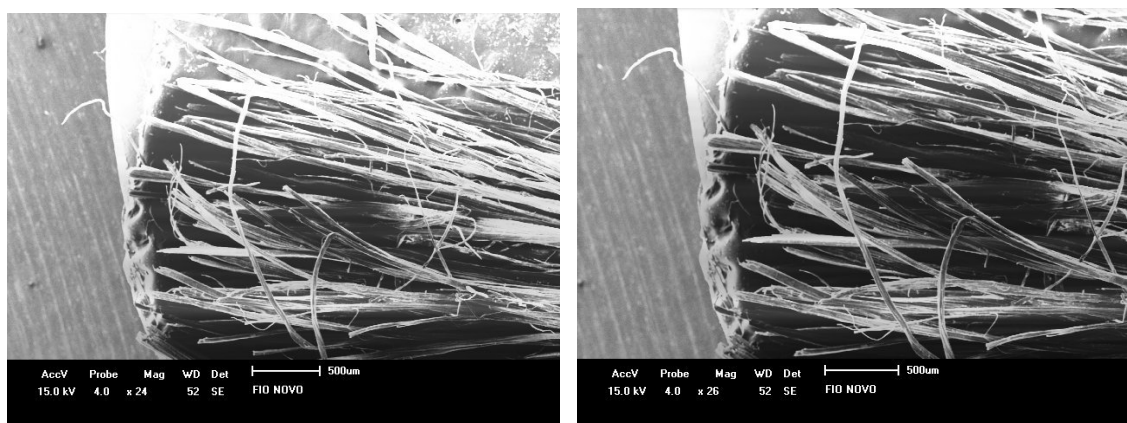


Figura 44: Fratura de um fio de juta novo.

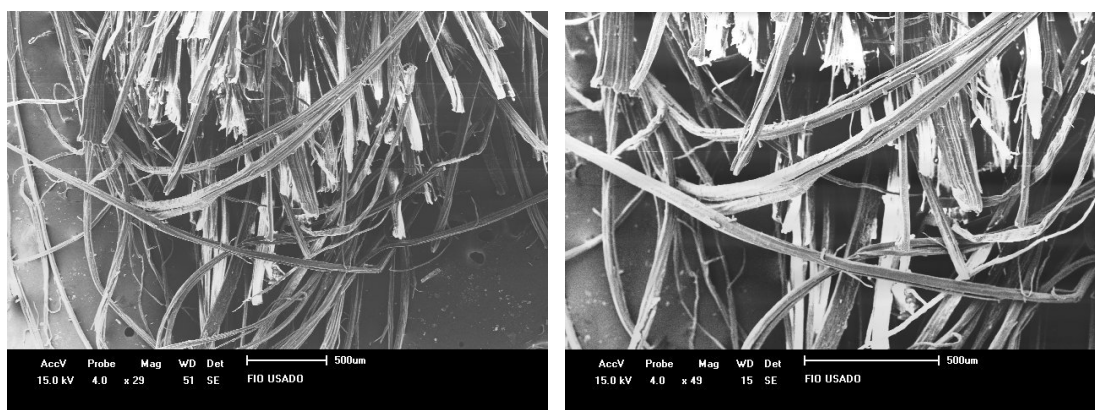


Figura 45: Fratura de um fio de juta usado.

#### 4.5.3 – FRATURA DOS ENSAIOS DE IMPACTO

As análises da superfície de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de impacto Charpy, permitiram a obtenção de informações do desempenho dos compósitos de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo. Na figura 46 pode ser vista a região de fratura de um corpo de prova com 0% de tecido de juta, ou seja, polietileno puro.



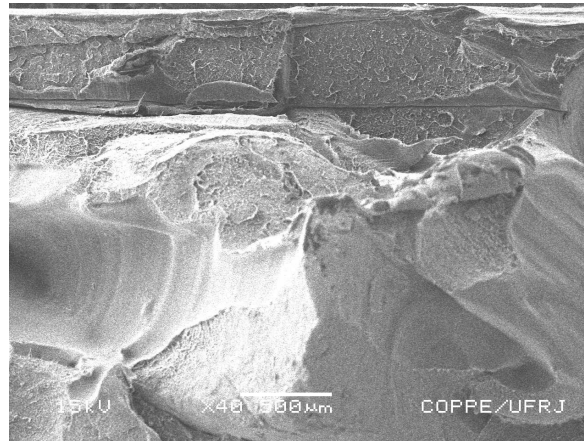


Figura 46: Micrografia da superfície de fratura de um corpo de prova com 0% de tecido de juta novo

O aspecto da região de fratura de corpos de prova com 30 e 40% de tecido de juta é apresentado na figura 47 (a) e (b), respectivamente. Estas fraturas ocorreram predominantemente por delaminação, isto é, separando o tecido da matriz longitudinalmente ao eixo associado ao comprimento do corpo de prova. Este fato é decorrente da propagação de trincas no impacto seguir o plano dos tecidos, possivelmente devido à baixa tensão cisalhante da interface tecido/matriz.

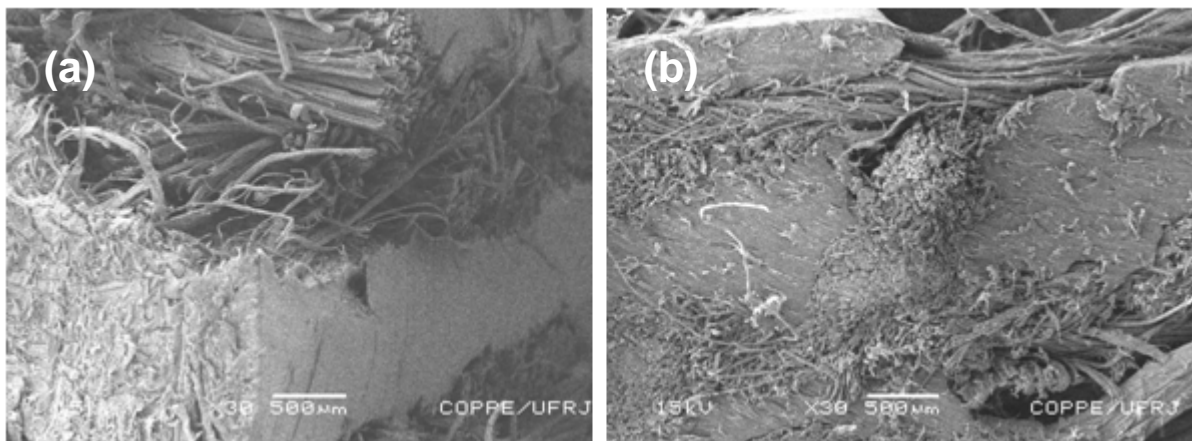


Figura 47: Micrografia da superfície de fratura de um corpo de prova testado em impacto charpy com 30% (a) e 40% (b) de tecido de juta novo.

Observa-se também nas figuras 47 (a) e (b) uma marcante participação das fibras no processo de ruptura do compósito. Pode-se perceber que o tecido de juta contribui de maneira efetiva no aumento da resistência do compósito e, conseqüentemente, no aumento na energia de impacto Charpy. O entrelaçamento das fibras ajuda a prender a matriz relativamente macia de polietileno. Conseqüentemente, quanto maior for a quantidade de tecido de juta adicionado à

matriz de polietileno, maior será a energia de impacto absorvida pelo compósito.

Finalmente, é importante ressaltar que o maior reforço acarretado pelo tecido deve-se ao fato de a juta ser uma das mais resistentes fibras lignocelulósicas, com propriedades que a torna, potencialmente, boa para reforço de compósitos poliméricos.

As análises da superfície de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de impacto Izod, permitiram a obtenção de informações do desempenho dos compósitos de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo e usado. Na figura 48 (a) e (b) pode ser vista a região de fratura de um corpo de prova com 0% de tecido de juta, ou seja, polietileno puro.

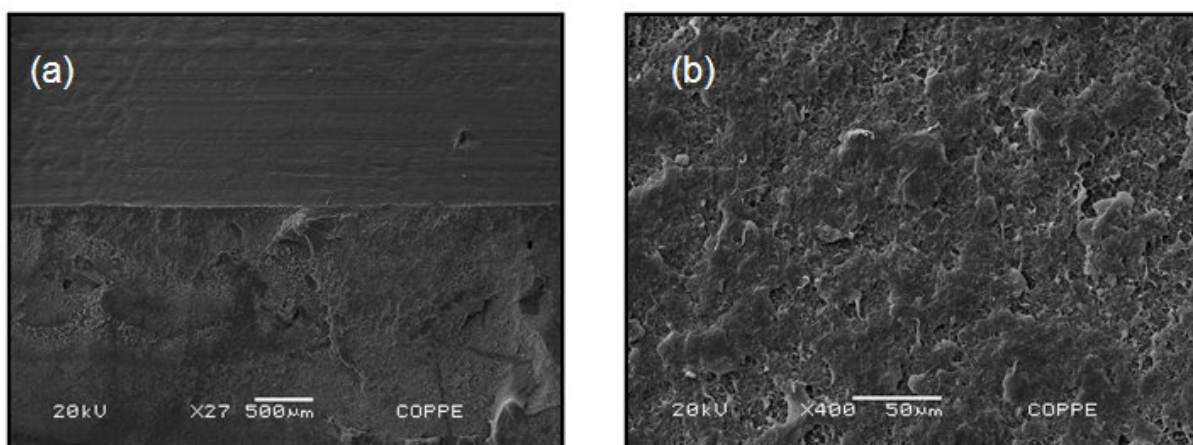


Figura 48: Micrografias da região de fratura de corpos de prova de polietileno reciclado puro (0% de tecido de juta). (a) região do entalhe, (b) superfície de fratura.

Nos corpos de prova constituídos inteiramente de polietileno reciclado, podem-se observar marcas características do processo de ruptura esperado para este polímero. Na parte superior da figura 48 tem-se uma região que corresponde ao entalhe feito pela ferramenta especial. A parte inferior, composta por regiões claras e escuras, corresponde à superfície de fratura do polietileno após o ensaio de impacto Izod, figura 48 (b). O aspecto da região de fratura dos corpos de prova com 10 e 30% de tecido de juta é apresentado nas figuras 49 (a) e (b), respectivamente.

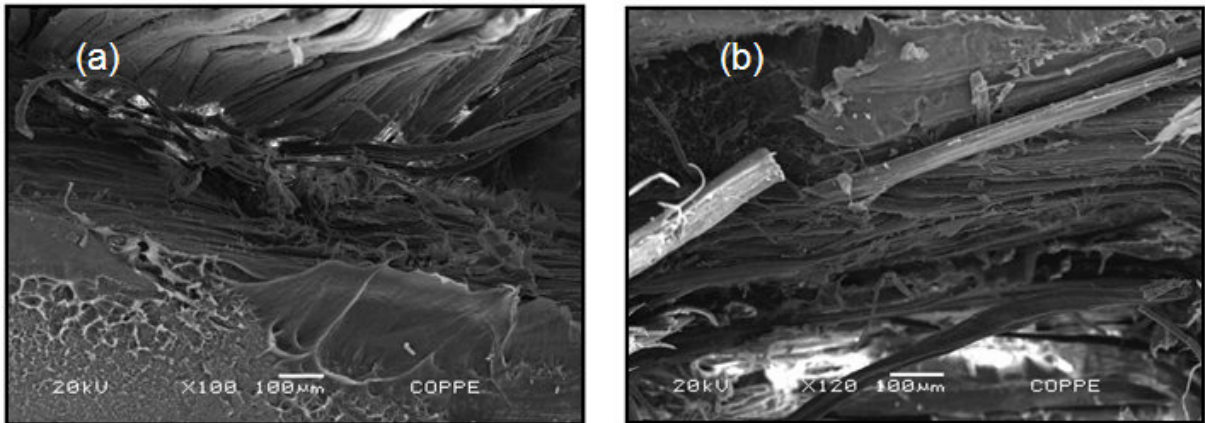


Figura 49: Micrografia da superfície de fratura de um corpo de prova com 10% (a) e 30% (b) de tecido de juta novo.

As figuras 50 (a) e (b) mostram o aspecto da região de fratura dos compósitos com matriz de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta usado com 10 e 30% respectivamente.

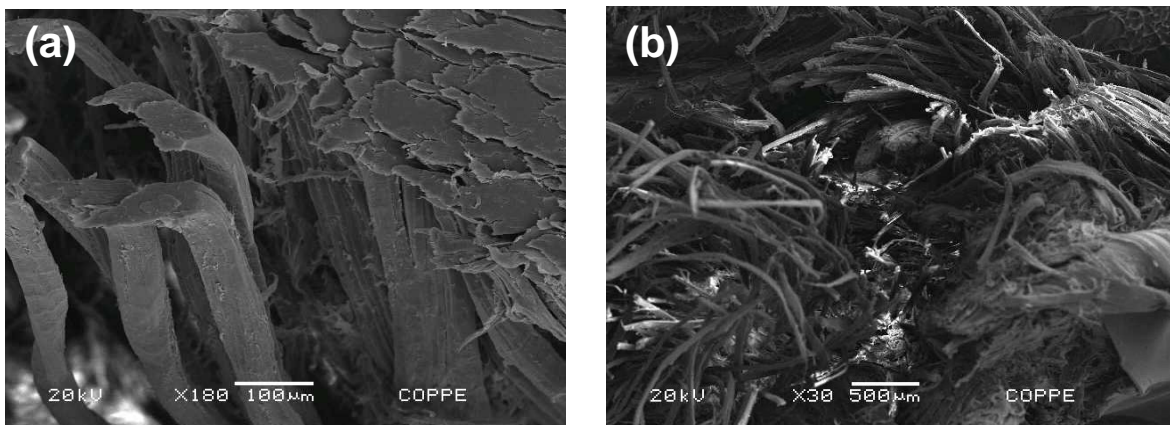


Figura 50: Micrografias da superfície de fratura de um corpo de prova com 10% (a) e 30% (b) de tecido de juta usado.

No caso de testes de impacto Izod pode-se perceber que a matriz também prende as fibras que constituem o tecido e a tenacidade ao impacto aumenta com o aumento do teor de tecido de juta seja novo ou usado, como comprovam os resultados anteriormente apresentados neste trabalho.

#### 4.5.4 – ENSAIO DE FLEXÃO

A figura 51 apresenta uma micrografia por MEV de detalhe do tecido de juta. Nesta figura pode-se observar que os fios da malha são formados por um trançado grosseiro de fibras de juta com evidências de já ter ocorrido esgarçamento. Os espaços entre as fibras no trançado, por outro lado, podem favorecer a impregnação do tecido pelo polietileno fundido durante o processamento do compósito.

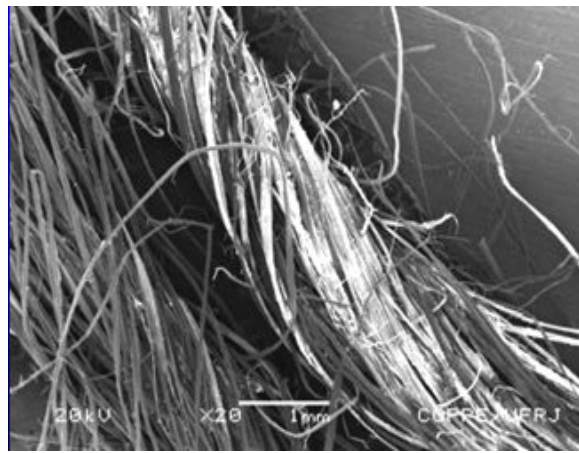


Figura 51: Micrografia por MEV das fibras trançadas de juta formando os fios do tecido.

A Figura 52 apresenta uma micrografia por MEV da superfície de uma partícula obtida de pedaços de polietileno reciclado antes de serem aquecidos no molde para a formação da matriz do compósito. Em relação a essa figura, vale a pena comentar que o polietileno reciclado possui uma aparência relativamente homogênea sem evidências de contaminação.

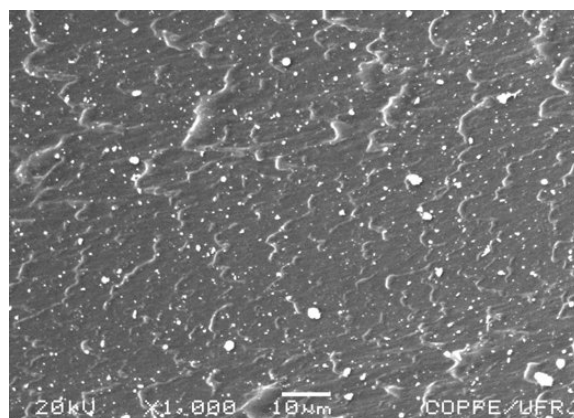


Figura 52: Micrografia por MEV da superfície de uma partícula de polietileno

reciclado.

A figura 53 ilustra, por micrografias de MEV, o aspecto típico da superfície de fratura de corpos de prova com: (a) 0% e (b) 30% em peso de tecido de juta usado . No caso do corpo de prova constituído inteiramente de polietileno reciclado, figura 53 (a), a fratura apresenta marcas características do processo de ruptura esperado para este polímero. Já no compósito com 30% de tecido de juta, figura 53 (b) ocorre uma participação marcante das fibras no processo de ruptura.

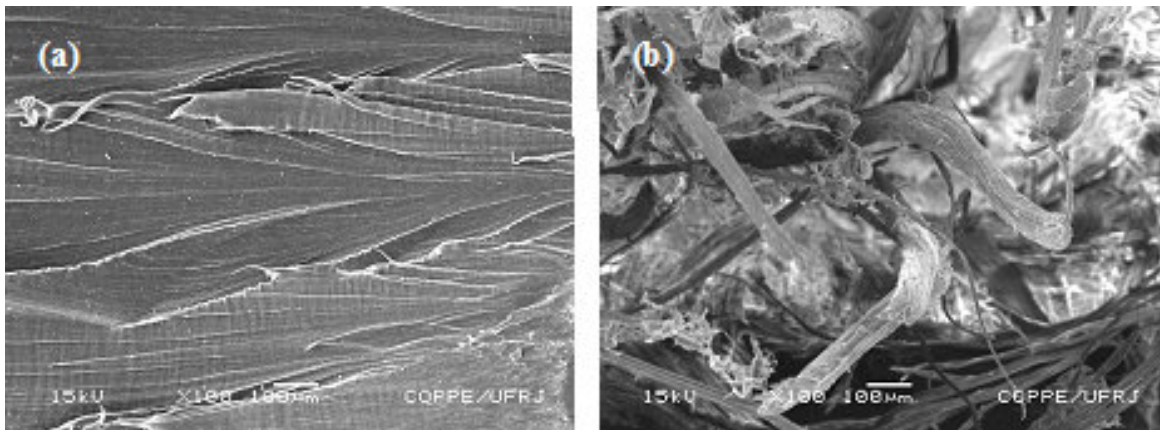


Figura 53: Micrografias da superfície de fratura de corpos de prova ensaiados em flexão: (a) polietileno puro; (b) compósito com 30% de tecido de juta.

Detalhes da inserção da fibra na matriz mostrado na figura 54 revelam que as fibras de juta estão aparentemente bem aderidas à superfície de ruptura do polietileno. Em conseqüência, até 30%, quanto maior for a quantidade de tecido de juta, mais eficiente torna-se o mecanismo de transferência de esforços da matriz para a fibra.

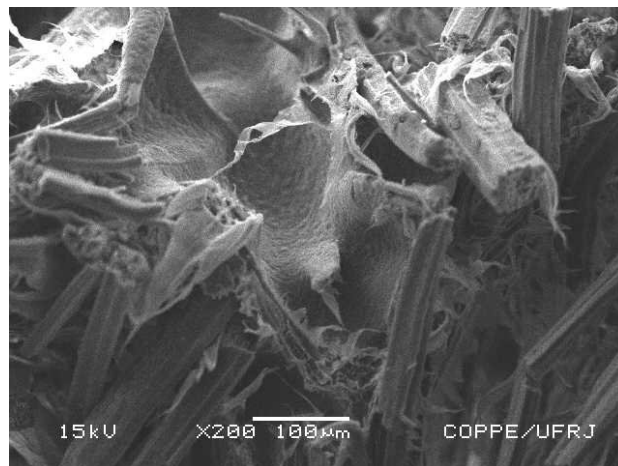


Figura 54: Detalhes de fibras do tecido de juta inseridas na matriz de polietileno.

#### 4.6 - COMPARAÇÃO COM MATERIAIS CONVENCIONAIS

Um aspecto importante a ser mencionado nesta tese diz respeito ao potencial que os compósitos de tecido descartado de juta reforçando matriz de polietileno reciclado apresenta para substituir materiais tradicionalmente utilizados em construção civil e mobiliário. Este potencial baseia-se, em primeiro lugar, no desempenho mecânico que naturalmente se espera de compósitos poliméricos reforçados com fibra de juta. Para ilustrar comparativamente este desempenho, a tabela 11 destaca a resistência à flexão de compósitos reforçados com fibra de juta, inclusive a desta tese, em confronto com outros materiais convencionais.

Tabela 11- Resistência à flexão de compósitos de juta e de outros materiais convencionais

Material	Fração em peso (%)	Resistência à flexão (MPa)	Referência
Tecido de juta/ polietileno reciclado	30	28,66	Esta tese
Fibra alinhada de juta/poliéster	44	89	Mohanty, et all, 1995
Fibra alinhada de juta/epóxi	33	150	Shah, et all, 1981
Fibra picada de juta/poliestireno	30	55	Snijder, et all, 1998
Madeira compensada	-	15-21	Carter, et all, 1991
Painel de madeira de baixa densidade	-	5-10	Youngquist, 1986
Painel de gesso	-	9-11	Monteiro et all, 2005

Em segundo lugar, o custo corrobora o potencial específico dos compósitos investigados no presente trabalho. Embora não seja possível ter-se com precisão o custo total destes compósitos, é possível se fazer uma estimativa que permita compará-los com outros materiais. Assim, a Tabela 12 apresenta esta estimativa de custo, levando-se em conta os seguintes parâmetros:

- Custo do polietileno reciclado: R\$ 1,00 / kg;
- Custo do saco usado de juta: até agora nulo;
- Custos de processamento e adicionais : R\$ 0,20 / kg
- Lucro de 30% sobre o valor final.

Na Tabela 12 também estão apresentados os preços no comércio, referentes ao ano de 2009, de outros materiais. Esta tabela, em sua última coluna, apresenta uma relação entre o custo e a resistência mecânica, cujo valor, quanto menor, corresponderia a uma melhor relação custo/benefício para o material.

Tabela 12: Preço para comercialização dos compósitos juntamente com o preço de venda (2009) de outros materiais.

<b>Material</b>	<b>Preço (R\$/kg)</b>	<b>Preço/Resistência (R\$/kg.MPa)</b>
Polietileno reciclado	1,56	0,10
Compósito com 30% de tecido de juta usada	1,17	0,04
Compósito com 40% de tecido de juta usada	1,04	0,05
Madeira compensada	1,82	0,09
Painel de baixa densidade	1,53	0,15
Painel de gesso	0,83	0,08

Tendo em vista os resultados apresentados na Tabela 12, observa-se que os compósitos com 30 e 40% de tecido de juta apresentam as mais baixas relações de custo/benefício, o que significa as melhores condições comparativas para seu emprego. Além disto, vale a pena acrescentar os seguintes comentários. Em termos de preço, os compósitos com matriz de polietileno reciclado, reforçada com tecido de juta de sacos descartados, são competitivos em confronto com materiais convencionais para a construção civil e mobiliário. Na verdade, somente o painel de gesso é mais barato que os compósitos investigados. Mesmo assim, dentro dos parâmetros propostos, a partir da incorporação de 57% de tecido de juta, o que não foi feito nesta tese, o compósito se tornaria mais barato que qualquer material convencional.

Em termos da relação preço/resistência mecânica, ou seja, custo/benefício, o compósito com 30% de tecido de juta é insuperável comparativamente a qualquer outro material convencional. Por fim, nunca é demais lembrar que estes compósitos são ambientalmente corretos e relativamente impermeáveis, o que os coloca em uma classe de materiais com potencial para substituir a madeira e evitar o

desmatamento.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES**

- O tecido retirado dos sacos de aniagem novos é bem mais resistente, quase três vezes, que o dos sacos descartados.
- Fios e fibras não tiveram suas resistências à tração afetadas pelo uso dos sacos de aniagem de juta até serem descartados. Houve um decréscimo na capacidade de deformação dos mesmos, possivelmente devido ao processo de esgarçamento.
- Um dano localizado no tecido se constitui no ponto inicial para a propagação de uma falha que acarreta esgarçamento da estrutura do mesmo e compromete a resistência de compósitos incorporados com o tecido.
- Os compósitos reforçados com tecidos novos apresentam maior tolerância ao dano, o que favorece a resistência do compósito comparativamente à do tecido usado.
- Através do ensaio de impacto Charpy em polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo foi concluído que a incorporação de tecido de juta novo na matriz de polietileno reciclado aumenta consideravelmente a tenacidade ao entalhe do compósito.
- Um aumento relativamente maior na energia ocorre quando a porcentagem de tecido varia de 20 para 30%, passando a energia de 138,5 para 272,0 J/m. Esse aumento na tenacidade ao entalhe pode ser explicado devido à grande energia despendida em se dobrar as fibras que não conseguem ser rompidas dentro dos procedimentos do ensaio Charpy.
- Esse mesmo aumento de 10% no teor de tecido de juta não acarretou uma elevação tão significativa quando a porcentagem de tecido variou de 30 para 40%, fazendo a energia aumentar somente de 272,0 para 273,0 J/m.



- O ensaio de impacto Izod de compósitos de polietileno reciclado reforçados com tecido de juta novo revelou que a incorporação de tecido de juta na matriz aumenta a tenacidade do compósito.
- As fibras que constituem o tecido de juta nova contribuem com o aumento da resistência dos compósitos, fazendo aumentar a energia de impacto Izod.
- Dentro da margem de erro, o tecido usado comporta-se melhor como reforço de compósitos de polietileno reciclado do que o tecido novo relativamente aos ensaios de impacto Izod. Uma possível explicação para este comportamento seria a relativamente maior heterogeneidade no trançado dos fios do tecido usado.
- O tecido de juta acompanha, até certo ponto, a deformação da matriz de polietileno. Isto pode ser sinal de um razoável acoplamento entre a fibra e o polietileno.
- De um modo geral a incorporação do tecido de juta, tanto novo quanto usado aumenta a resistência à flexão dos de polietileno reciclado
- Porcentagens em peso de tecido de juta tanto novos quanto usados maiores que 30% causam diminuição nos valores de resistência a flexão dos compósitos fabricados.
- Existe uma sensível diferença de maior resistência à flexão dos compósitos com tecidos novos, comparativamente aos correspondentes com tecido usado.
- O módulo de flexão (0,42 GPa) obtidos para o polietileno puro nesta tese são comparados com os valores encontrados na literatura (Callister, 2004) para o polietileno de baixa densidade. Este fato indica que o polietileno reciclado utilizado neste trabalho tem suas propriedades mecânicas semelhantes à resina virgem.

- Com base nos resultados de DMA, verificou-se que o polietileno reciclado puro apresentou um menor valor da temperatura de transição vítrea. A temperatura de transição vítrea aumenta ligeiramente com a incorporação do tecido de juta.
  
- O módulo de armazenamento da matriz pura é levemente menor do que o dos compósitos. Verificou-se que o módulo de armazenamento apresenta valores maiores para o compósito com 20% de tecido de juta. Sugere-se que devido a danos nos tecidos de juta associados à baixa resistência interfacial fibra/matriz, ocorre uma tendência de reforço da matriz de polietileno reciclado por volta de 20% de tecido usado de juta.
  
- De acordo com os valores obtidos para o módulo de perda, verificou-se uma nítida predominância do compósito com 20% de tecido de juta oferecerem efetivo reforço à matriz.
  
- A fratura de uma fibra e um fio de juta novo apresentaram uma certa homogeneidade, enquanto fratura de uma fibra e um fio de juta usado apresentaram uma superfície de fratura heterogênea.
  
- Uma avaliação preliminar do possível preço de comercialização dos compósitos investigados, baseada em parâmetros propostos para os custos de material, fabricação e outros adicionais, mostrou vantagens comparativamente a materiais convencionais, inclusive aqueles à base de madeira.

## CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A biblioteca virtual do estudante brasileiro (1999). Disponível em: <http://bibvirt.futuro.usp.br/acervo/paraditat/frutas/juta>.

ABIQUIM, (2008): Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados.

ABBOT, N.; SKELTON, J. (1972): Crack Propagation in Woven Fabrics, *J. Coated Fibrous Mat.*, 1, p. 234.

ANDERSON, T.L. (1995): *Fracture mechanicals: fundamentals and applications*. 2ª edição. Boca Ration: CRC Press.

ANTUNES, A. M. S.; GIANINI, R. G.; BORSCHIVER, S; PEREIRA, V. L. S. B. (2000): Tendências tecnológicas de polietilenos e polipropilenos através da prospecção em documentos de patente nos Estados Unidos e Europa. – 1990/1997; *Polímeros: Ciência e Tecnologia*; Nº1, V.10, p. 56-63.

AQUINO, R.C.M.P.; D'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. (2001): Flexural mechanical properties of piassava fibers (*Attalea funifera*)-resin matrix composites. *J. Mater. Sci. Letters*, V. 20, p. 1017-1019.

ARAÚJO, C.R.; MOTHÉ, C.G. (1998): Characterization of natural fiber reinforced polyurethane composites. *Second International Symposium on Natural Polymers and Composites*. São Paulo-SP, p. 123-126.

BALEY, C.et al. (1997): *Matériaux composites renforcés par des fibres naturelles*. *Composites - A French-English Bilingual Magazine*, Oxford, V.22, p.28-34.

BEAUMONT, P.W.R. (1989): The failure of fibre composites: an over view. Journal of Strain Analysis. V. 24, n4, p. 189-205

BIKIARIS, D.; MATZINOS, P.; PRINOS, J.; FLARIS, V.; LARENA, A., PANAYIOTOU, C. (2001) Use of sinales and copolymers as adhesion promoters in glass fibre/polyethylene composites. Journal of Applied Polymer Science. v. 80, n. 14, p. 2877-2878.

BISANDA, E.T.N. (2000): The effect of alkali treatment on the adhesion characteristics of sisal fibers. Applied Composite Materials, Hingham, V.7, p.331-339.

BLEDZIKI, A.K., GASSAN, J. (1999): Composites reinforced with cellulose-based fibers, Progress. Polymer Science. V. 24, N°2, p. 201-274.

BONELLI, C.M. (1994): Perfil de Recicladora de Plástico, Reciclagem & Negócios – Plástico Granulado CEMPRE

BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H.(1989): Polymer Handbook; 3° edição; Inc. John Wiley & Sons; Canadá.

BURZIC, M et al. (2001): The effect of fiber orientation on impact toughness and fracture properties of carbon fiber-epoxy composite. In: Charpy Centenary Conference. França. Elsevier. n. 30. p. 417-424.

CABRAL, H.; CISNEROS, M.; KENNY, J.M.; VASQUEZ, A.; BERNAL, C.R. (2005): Structure – properties relationship of short jute fiber-reinforced polypropylene composites. Journal of Composites Materials. V. 39, N°1, p. 51-65.

CALLISTER, W. D. Jr.; (2002): Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.

CANEVAROLO JR, S.V. (2003): Técnicas de Caracterização de Polímeros. São Paulo: Editora Artliber.

CANTWEL, W. J E MORTON, J., (1991): The impact resistance of composites materials – a Review – Composites; V. 22, N<sup>o</sup>5.

CARLESS, J. (1992): Taking out the trash, Washington DC: Island Press.

CARTER G. F., PAUL D. E. (1991): Materials Science and Engineering, pp. 281, 2 ed., Metals Park, USA, ASTM International.

CARVALHO, L.H., CAVALCANTI, W.S. (2006): Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, n<sup>o</sup>1, p. 33-37.

CASTELANOS, O. L. (1987): Materiales Compuestos Termoplásticos, Matrices, Patículas y Fibras Cortas. Ver. Plast. Mod,54, p. 722-725.

CHAND, N. e HASHIM, S.A.R. (1993): Mechanical Properties of Sisal Fiber at Elevated Temperatures..J. Mat. V. 28, p 6724-6728.

CHAVAMI, K. (1999): Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers. Cement & Concrete Composites. V. 21, N<sup>o</sup>1, p. 39-48 .

CHAWLA, K.K. (1993): Composites Materials , Springer – Ver-Lag, New York.

COLOM, X.; CARRASCO, F.; PAGES, P.; CANAVATE, J. (2003): Effects of different treatments on the interface of HDPE/Lignocellulosic fiber composites. Compos Sci. Technol., V. 63, p. 161-169.

COSTA F.H.M.M.; D'ALMEIDA J.R.M. (1999): Effect of water absorption on the mechanical properties of sisal and jute fiber composites. *Polym.-Plast. Technol. & Eng.*, V. 38, p. 1081-1094.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. (2003): Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações; *Polímeros: Ciência e tecnologia*; N° 1, V. 13, p.1-13.

CRUZ-RAMOS, C.A. (1986): Natural fiber reinforced thermoplastics. *Mechanical Properties of Reinforced Thermoplastics*. Elsevier.

CUNHA, E.J.S. (1998): Utilização industrial de fibras vegetais. Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais. Belém: UFPA/ NUMA/ POEMA, p.82.

d'ALMEIDA, J.R.M. (1987): Propriedades mecânicas de fibras de juta, *Ciência e Cultura*, V. 39, N° 11, p. 1023-1025.

d'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. (2003): Compósitos reforçados por fibras naturais – oportunidades e desafios, 58° Congresso Anual da ABM, p. 1-10. Rio de Janeiro, Brasil.

DAVIDSON, D.L.; NICOLELLA, D.P.; SPIGEL, B.S. (2000): Fracture toughness of fabrics as composite reinforcements. *Experimental Mechanics*, V. 40, N° 4, p.408-414.

DOAN, T.T. L, GAO, S.L., MÄDER, E. (2006): Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification. *Composites Science and Technology*. V. 66, p. 952 – 963.

DOTAN, A.L., et al (1989): Efeito do tratamento químico das fibras de juta na interface fibra/matriz em conjugados juta/poliéster, analisando-se a extração das fibras da matriz (pull-out). Congresso de Engenharia Mecânica, Recife, Anais. Rio de Janeiro: ABCM.

DUTSON, T.E.(1993): Recycling solid waste – The first choice for private and public sector management, Westport: Quorum Books.

EICHHORN, S. J.; BAILLIE, C.A.; ZAFEIROPOULOS, N.; MWAKAMBO, L.Y.; ANSELL, M.P.; DUFRESNE, A. (2001): Review of current international research into cellulosic fibres and composites. J. Mater. Science, v. 36, p. 2107-2113.

ENGLISH, L. K. (1987): Fabrication the future with composite materials- part III: Matrix Resins. Mater. Eng, V.104, p. 33-37.

EZQUERRA, T. A.; CONNOR, M. T.; ROY, S.; KULESCZA, M .; FERNADES, N, J.; BATA-CALLEJA, F.J. (2001): Alternating current electrical properties of graphite, carbon black and carbon fiber polymeric composites; Composites Science and Technology; V. 61, p. 903-909.

FELIX, J.M.; GATENHOLM, P. The nature of adhesion in composites of modified cellulose fibre and polypropylene. J. Appl. Polym. Sci. v. 42, p. 601-620, 1991.

FERREIRA, A.B.H. (1986): Novo Dicionário da Língua Portuguesa. 2º edição. Rio de Janeiro. Editora Nova Fronteira.

FREIRE, E. (1992): Caracterização e análise estrutural de polipropileno reforçado com fibra de vidro através do método de elementos finitos. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros), Rio de Janeiro-Rj, Instituto de Macromoléculas

Professora Eloísa Mano/ Universidade Federal do Rio de Janeiro—IMA/UFRJ, p. 1-27.

FRENGEL, D.; WEGENER, G. (1989): Wood: chemistry ultrastructure reactions. Berlin: Walter de Gruyter.

FU, S.Y.; LAUKE, B.; MADER, E.; HU, X., YUE, C.Y. (1999): Fracture Resistance of Short-Glass-Fiber-Reinforced and Short –Carbon-Fiber-Poly-propylene under Charpy Impact Load and its Dependence on Processing. *Journal of Materials Processing Technologies*, V. 89/90, p. 501-507.

GAO, Z.; REINFSHINDER, K.L. (1992): Tensile failure of composites, influence of interface and matrix yielding. *Journal of Composites Technology and Research*. V. 14, p. 201-202.

GASSAN, J.; BLEDZIKI, A.K. (1999): Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxi composites by treatment of fibers. *Composites Science and Technology*. V. 59. p. 1303-1309.

GATENHOLM, P. (1997): Interfacial adhesion and dispersion in composites. *Molecular Interactions Between Cellulose and Other Polymers*.

GODFREY, T.A.; ROSSETOS, J.N. (1999a): Damage growth in prestressed plain weave fabrics. *Textile Research Journal*, V. 68, p. 359-370.

GODFREY, T.A.; ROSSETOS, J.N. (1999b): A parameter for comparing the damage tolerance of stressed plain weave fabrics. *Textile Research Journal*, V. 69, N° 7, p. 503-511.

GODFREY, T.A.; ROSSETOS, J.N. (1999c): The onset of tear propagation at slits in stressed uncoated plain weave fabrics. *J. Appl. Mech.*, V. 66, p. 926-933.



GOWDA, T.M.; NAIDU, A.C.B.; CHHAYA, R. (1999): Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. *Composites part A: applied science and manufacturing*. V. 30, p. 277-284.

HARMIA, T. (1996): Fatigue behaviour of neat long glass fibre (LGF) reinforced blends of nylon 66 and PP. *Polymer composite, Brookfield*. v. 17. n.6. p. 916-935.

HAYSON, H. W.; McGRATH, G. C.; COLLYER, A. (1986): *Mechanical properties of reinforced thermoplastics: Fiber, whiskers and flakes for composites applications*. London: Elsevier Applied Science Publishers, p.29-64.

HULL, D., CLYNE, T.W. (1996): *An Introduction to Composites Materials*, 2<sup>o</sup> edition, Cambridge University Press. Cambridge.

HYER, M.W. (1998): *Stress Analysis of reinforced composite materials*. Singapura. WCB/McGraw-Hill.

JONES, R. M., 1999: *Mechanics of Composite Materials*. 2<sup>o</sup> edição.

JOSEPH, K. et. al., (1996a): Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites. *Polymer*. V. 37, N<sup>o</sup>. 23, p. 5139-5149.

KO, W.L. (1975): Fracture Behavior of a Nonlinear Woven Fabric Material. *J.Composite Mat.*, 9, p. 361-369.

KUBAT, J.; RIODHAL, M.; WELANDER, M. (1990): Characterization of interfacial interactions in high density polyethylene filled with glass spheres using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 39, n. 7, p. 1527-1539.

KUMAR, A.P.; SINGH, R.P.; SARWADE, B.D. (2005): Degradability of Composites, Prepared from Ethylene-Propylene Copolymer and Jute Fiber under Accelerated Aging and Biotic Environments. *Mat. Chemistry and Physics*, v. 92, p. 458-469.

LAVENGOOD, R E.; SILVER, F.M. (1988): *Engineering Materials Handbook, Engineering Plastic: Intepreting Sipplier Data Sheets*. Metals Park: ASM International; v.2, p.638-645.

LEÃO, A.L., CARASCHI, TAN, I.H. (2000): Curauá Fiber – A Tropical Natural from Amazon-Potential and application in Composites. *Natural Polymers and Agrofibers Composites*. P. 257-272, São Paulo, Brasil, USP & UNESP.

LEÃO, A.L.; CARVALHO, F.X., FROLLIN, E. (1997): *Lignocellulosic – Plastic Composites*. USP & UNESP, Brasil.

LIMA A.C.; MONTEIRO S.N.; TERRONES, L.A.H. (2008): Influence of weave damage on the strength of composites reinforced with jute fabric. In: *Characterization of Minerals Metals & Materials – TMS Conference*, Mar., New Orleans, EUA, p. 1-6.

MACHADO, M.A.L., BIAGIOTTI, J.; KENNY, J.M. (2002): Comparative study of the effects of different fibres on the processing and properties of ternary composites based on PP-EPDM blends. *Poly. Compos.* v. 23, p. 779-789.

MANO, E.B; MENDES, L. C. (1998): *Introdução à Polímeros*; Editora Edgard Bluncher Ltda; 2º edição.

MANO, E.B; (1991): *Polímeros como Materiais de Engenharia*; Editora Edgard Bluncher Ltda.

MANO, E. B; MENDES, L. C. (2001): Identificação de Plásticos, borrachas e fibras. Editora Edgard Bluncher Ltda. Capítulo 2. p. 7.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. (1994): Composites Materials: engineering and science. Londres. Chapman & Hall.

MATTOSO, L.H.C.; FERREIRA, F.C.; CURVELO, A.A.S. (1997) Sisal fiber: morphology and applications in polymer composites. In: International Symposium.

Mc RAE, M. A.; MADDAMS, W. F.; (1976): Die Makromol. Chem., 177; p 449.

MEDEIROS et all (2002): CIRCULAR TÉCNICA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. ISSN: 1517-4778: O uso de fibras vegetais para melhoria das propriedades de materiais plásticos.

MEDINA, J. C. (1959): Plantas fibrosas da flora mundial, Instituto Agrônômico de Campinas, SP, Brasil.

MIJOVIC, J. (1989): Thermoplastics matrices for advanced composites. Polymer, News, V. 14, p.177-186.

MOHANTY, A.K., KHAN, M.A., HINRICHSEN, G. (2000) a: Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics—polyester amide composites. Composites Part A: applied science and manufacturing. V. 31, p. 143 – 150.

MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. (2000) b: Biofibers biodegradable polymers and biocomposites: an review. Macromolecular Materials and Engeneering, Weinhein, v. 276/277, N°1, p. 1-24.

MOHANTY, A. K. e MISRA, M. (1995): Studies on jute Composites. A Literature Review. Polym, Technol. Eng., V. 34, p. 729-792.

MOHANTY, S.; VERMA, S.K.; NAYAK, S.K. (2006): Dynamic mechanical and properties of MAPE treated jute/HDPE composites. Composites Science and Technology. V. 66, p. 538-547.

MONTEIRO, S.N.; CAMERINI, A.L.; PETRUCCI, L.J.T.; TERRONES, L.A.H.; D'ALMEIDA, J.R.M. (2005): Environmentally correct jute reinforced polyethylene composites. In: CHARACTERIZATION OF MINERALS, METALS & MATERIALS TMS CONFERENCE, San Antonio, EUA, , 1CD. p. 1 – 8.

MONTEIRO, S.N., D'ALMEIDA, J.R.M., PETRUCCI, J.L.T. (2005): Estudo Comparativo do Desempenho de Painéis Compósitos à Base de Resíduos Poliméricos, In: 60º Congresso Anual da ABM, pp. 1-9, Belo Horizonte, Brasil.

MONTEIRO, S.N.; RODRIGUEZ, R.J.S.; LOPES, F.P.D.; SOARES, B.G. (2008): Efeito da incorporação de fibras de coco no comportamento dinâmico mecânico de compósitos com matriz poliéster. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. v. 5, n.2, p. 111-115.

MONTEIRO, S.N.; RODRIGUES, R.J.S.; SOUZA, M.V.E.; d'ALMEIDA, J.R.M. (1998): Adv. Perfomace Materials, V.5 p.1.

MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; CAMERINI, A.L.; PETRUCCI, L.J.T.; D'ALMEIDA, J.R.M. (2006): Compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno. In: 61º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, Rio de Janeiro, Brasil, 1CD. p. 1 – 8.

MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; d'ALMEIDA, J.R.M; LOPES, F.P.D. (2005):

Structural characteristics and properties of coir fibers wastes reinforced polymeric composites. III International Congress on Materials. p. 1-6, Catagena Colômbia.

MONTEIRO S.N.; LOPES, F.P.D.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O. (2009): Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. JOM, v. 61, n. 1, p. 17-22.

MORASSI, O.J. (1994): Fibras naturais – aspectos gerais e aplicações na indústria automobilística. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Águas de São Pedro. Anais.

MOREAU, M.S. (1997): Ocorrência, manejo, produtividade, e canais de comercialização da piaçava na Bahia, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC, Ba.

NABI SAHEB, D.; JOG, J.P. (1999): Natural fiber polymer composites: A review. Advances in Polymer Technology, v. 18, p. 351-363.

NOLASCO, A.M. (1997): Relatório do Projeto de Aproveitamento dos Resíduos da Agroindústria da Banana no Vale do Ribeira, 11. Piracicaba, LED-Esalq-USP/SCTDE-SP.

OSSWALD, T.A.; MENGES, G. (1995): Materials Science of Polymers for Engineers; Hanser/Gardner Publications; New York; p. 133-405.

PAULA, C.M.S.S. (1996): Estudo da influência do tratamento químico de fibras de sisal na resistência mecânica de compósitos sisal/epóxi. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas.

PETRUCCI, L.J.T. (2004): Estudo da influência da incorporação de aditivos em misturas de compósitos poliméricos reciclados. Tese (Doutorado em Engenharia e

Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes.

PINTO, A.G. (1997): Plástico. In: IPT/ CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. p. 181-192.

PRASAD, S.V.; PAVITHRAM, C. et al. (1983): Álkali treatment of coir fibers for coir – polyester composites. Journal of Materials Science, V.18, p. 1443-1454.

RAY, D.; SARKAR, B.K.; BOSE, N.R. (2002): Impact fatigue behaviour of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali treated jute fibers. Composites. V. 33, N° 2, p. 233-241.

ROLIM, A. M. (2000): Oportunidades na reciclagem de pete inovação: estudos de dois casos, Anais do XXI Simpósio de Gestão da Inovação tecnológica – São Paulo, p.1 -12.

RONG, M.Z. et al. (2001): The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. Composites Science and Technology, Oxford, V. 6, N°10, p. 1437-1447.

SALAZAR, V.L.P.; LEÃO, A.L. (2000): Life cycle assessment of automobile seats based on coconut fiber and latex. Onternational Symposium on natural Polymers and composites, 3, São Pedro. UNESP/EMBRAPA/USP. p. 484-487.

SANTIAGO, B.H.S.; PANNIRSELVAM, P.V.(2005): Desenvolvimento de Projeto para Produção de Fibra de Coco com Inovação de Tecnologia Limpa e Geração de Energia. Revista Analítica (ISSN 1677-3055, Ano 3, N° 15, p. 56 – 62.

SHACKELFORD, J.F. (1996): Introduction to materials science for engineers. 4º edição. Nova Jersey. Prentice-Hall.

SHAH, A.N.; LAKKAD, S.C. (1981): Mechanical properties of jute reinforced plastics. *Fibre Science and Technology*. V. 15, p. 41-46.

SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites: Part A*, v. 38, p. 1694-1709, 2007.

SAVASTRANO JR, H. (1997): Sistema de cobertura para construção de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agro-industriais. Relatório semestral de atividades.

SILVA, J.L.G. (1991): Estudo do comportamento das fibras de carbono do tipo I e do tipo II em simples tração em nó. Tese (mestrado em materiais, processos e Dinâmica de Sistemas), São José dos Campos -SP-, Instituto tecnológico de Aeronáutica –ITA.

SILVA, R.N.P. (2006): Crescimento e sintomas de deficiência de macronutrientes em plantas de curauá. Tese (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal Rural da Amazônia.

SILVA, R.V. (2003): Compósito de resina de poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo.

SILVESTRE FILHO, G.D. (2001): “Comportamento Mecânico do Poliuretano Derivado da Mamona Reforçado por Fibra de Carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril”. Tese de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia Mecânica.

SMITH, P.I.S., (1976): *Recycling waste*, New York: Scholium Intl. Inc.,

SNIJDER, M.H.B., REINERINK, E.J.M., BOS, H.L. (1998): Polypropylene and Polystyrene Reinforced with Annual Plant Fibers: Screening and Coupling Agents, In: 2<sup>o</sup> International Symposium on Natural Polymers and Composites, pp.135-138, Atibaia, Brasil.

SOUZA, S.A., (1982): Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos. São Paulo. Editora Blucher. 5<sup>o</sup> edição.

STRONG, A.B. (1989): Fundamentals os Composites: Meterials, methods and Applications. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.

SYDENSTRICKER, T.H.D.; MOCHNAZ, S.; AMICO, S.C. (2003): Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. Disponível em: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

TORREIRA, R.P. (1989): Fluidos térmicos. São Paulo. Editora Hemus Ltda. V. 2, p. 285.

VAJRASTHIRA, C.; AMORNASAKCHAI, T.; LIMCHAROEM, B. (2003): Fibre-matrix interaction in aramid short fibre reinforced thermoplastic composites. Journal of Applied Polymer Science, v. 87, n. 7, p. 1059-1067.

THWE, M.M.; LIAO, K. (2003): Environment degradation of bamboo/glass fiber hybrid polypropylene composites. J. Mater. Sci. Lett, V. 38, p. 363- 381.

YOUNG, R.A. (1997): Utilization of natural fiber: characterization, modification and applications. Lignicellulosic-Plastics Composites. São Paulo: USP; UNESP, p. 1-21.



YOUNGQUIST J. A. (1986): Natural Fiber Reinforced Composites, In: Gayson M.(eds), *Encyclopedia of Composite Materials and Components*, p.661, 3 ed., chapter 5, New York, John Wiley & Sons.

ZHU, W.H. TOBIAS, B.C. e CUTTS, R.S.P (1995): Banana Fibre Strands Reinforced Polyesters Composite. *J. Mat. Sci. Letters*, V. 14, p. 508-510.

WILBECK, H.; HARODA, J. (2005): Plásticos de Engenharia: tecnologia e aplicações. Editora Artliber. Capítulo 13. p. 197.