

**PROPRIEDADES E ESTRUTURA DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTINUAS
DE JUTA**

ISABELA LEÃO AMARAL DA SILVA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

2014

**PROPRIEDADES E ESTRUTURA DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTINUAS
DE JUTA**

ISABELA LEÃO AMARAL DA SILVA

“Tese de doutorado apresentado ao
Centro de Ciência e Tecnologia, da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro.”

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

2014

PROPRIEDADES E ESTRUTURA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTINUAS DE JUTA

ISABELA LEÃO AMARAL DA SILVA

“Tese de doutorado apresentado ao Centro de Ciência e tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais.”

Comissão examinadora:

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph.D.) – LAMAV/UENF

Prof. Sergio Neves Monteiro – Orientador (Ph.D.) – LAMAV/UENF

Prof.^a Denise Cristina de Oliveira Nascimento (Doutora) – UFF

Prof.^a Luciana Lezira Pereira de Almeida (Doutora) – UNESA

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese ao meu esposo Marcus Vinícius, que nos momentos mais difíceis me ajudou e me compreendeu. Aos meus filhos Pedro e Ana Julia, que com carinho e amor me deram ânimo para continuar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu Senhor Jesus que foi quem me sustentou me dando forças todos os dias.

Ao meu esposo Marcus Vinicius pela ajuda e compreensão, e aos meus filhos Pedro e Ana Julia por toda alegria e ânimo transmitidos.

Aos meus pais, Altamiro e Isabel, por toda confiança na realização deste trabalho.

Ao meu orientador Eduardo Atem de Carvalho, por ter aceitado o desafio desta orientação em reta final, mais que isso, pela amizade sempre demonstrada em toda minha vida nesta universidade.

Ao meu “orientador” e professor Sergio Neves Monteiro pelos ensinamentos prestados, por toda ajuda, incentivo e confiança.

Ao técnico Carlan pela realização dos ensaios de tração.

A Luciana por toda a ajuda na realização das análises no MEV.

Ao Rômulo por toda ajuda na preparação dos corpos de prova, e todos outros técnicos que passaram pelo laboratório de compósitos.

A todo o corpo docente do curso de engenharia e ciências dos materiais pelos ensinamentos que ajudaram a melhor compreensão deste trabalho.

Ao grupo de compósitos (gr.com), pela ajuda na elaboração deste trabalho.

A minha amiga Alice por está comigo me dando força e encorajando nos momentos difíceis de minha vida, sendo uma verdadeira amiga.

Agradeço aos professores que aceitaram participar de minha banca de defesa de tese.

Um agradecimento muito especial dedico aos meus familiares por toda força e incentivo para a realização deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que esta tese fosse realizada com sucesso, o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

INDICE DE FIGURA.....	vii
INDICE DE TABELA.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
2.1 Justificativas.....	2
2.2 Ineditismo.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Fibras Naturais 4	
3.1.1 Fibra de Juta.....	9
3.2 Compósitos 11	
3.2.1 Compósitos Poliméricos	12
3.2.1.1 Resina poliéster	15
3.2.1.2 Resinas epóxi.....	16
3.2.2 Compósitos Reforçados com Fibras Naturais	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 Materiais Utilizados 21	
4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da Fibra de Juta 22	
4.3 Ensaio Mecânicos 24	
4.3.1 Ensaio de tração da fibra (Weibull).....	24

4.3.2	Ensaio de Pullout.....	25
4.3.3	Ensaio de Tração dos Compósitos	26
4.3.4	Ensaio de Flexão de Fibras de Juta	27
4.3.5	Ensaio de Impacto de Charpy e Izod de Fibras de Juta	28
4.4	Análises térmicas	29
4.4.1	TGA/DTG e DSC	29
4.4.2	Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Análise de Weibull para Fibras de Juta	32
5.2	Ensaio de Pullout Compósito Juta em Matriz Poliéster.....	37
5.3	Ensaio de Tração.....	41
5.3.1	Compósito de Poliéster Reforçado com fibras de Juta.....	41
5.3.2	Compósito de Epóxi Reforçado com Fibras de Juta.....	45
5.4	Ensaio de Flexão.....	49
5.4.1	Compósito de Poliéster Reforçado com Fibras de Juta.....	49
5.4.2	Compósito de Epóxi Reforçado com Fibras de Juta.....	54
5.5	Ensaio de impacto.....	58
5.5.1	Charpy compósitos de juta em matriz poliéster.....	58
5.5.2	Charpy compósitos de juta em matriz epóxi.....	61
5.5.3	Izod compósitos de juta em matriz poliéster.....	65
5.5.4	Izod compósitos de juta em matriz epóxi.....	68
5.6	Análises Térmicas.....	71

5.6.1	TGA/DTG e DSC da Fibra.....	71
5.6.2	TGA/DTG e DSC juta em matriz epóxi.....	75
5.7	Análise Dinâmico-Mecânica (DMA).....	80
5.7.1	Compósito de Epóxi Reforçado com Fibras de Juta.....	80
6.	CONCLUSÕES	85
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - a) celulose, b) lignina e c) pectina.....	5
Figura 2 - a) talo do algodão de onde são retiradas as fibras, b) corte transversal do talo de algodão, c) feixe de fibras-celulares de algodão, d) folhas de sisal onde são retiradas fibras, e) corte transversal da folha de sisal e f) feixe de fibras-celulares de sisal.....	6
Figura 3 - Ilustração esquemática de uma fibra-celular.....	7
Figura 4 - Microfibrila constituída de porções cristalinas, micelas, que são formadas por segmentos de moléculas de celulose ordenadas.....	8
Figura 5 - Representação das ligações de hidrogênio que ocorrem nas moléculas de celulosas.....	8
Figura 6 – a) Planta de juta e b) extração da fibra de juta.....	10
Figura 7 - Macromolécula de uma resina poliéster.....	15
Figura 8 - Macromolécula de um poliéster curado.....	16
Figura 9 - Grupo Glidicil.....	16
Figura 10 - Resina epóxi antes de ser catalisado (Bisfenol A).....	16
Figura 11 - Resina epóxi à base de Bisfenol F.....	17
Figura 12 - Resina epóxi Bromadas.....	18
Figura 13 - Resina epóxi flexíveis.....	18
Figura 14 - Resina epóxi éter de diglicidil bisfenol A.....	19
Figura 15 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fibras naturais lignocelulosicas: a) sisal, b) bambu, c) coco e d) piaçava.....	20
Figura 16 – Planta típica de juta (a) e as fibras já extraídas de seu caule(b).....	22
Figura 17 – Resina epóxi (a) e resina poliéster cristal (b).....	23
Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura.....	23
Figura 19 - Distribuição de freqüência por diâmetro para fibras de bambu.....	24
Figura 20 - Representação esquemática do ensaio de pullout.....	25

Figura 21 – Corpo de prova antes (a) e depois (b) de serem ensaiados, fibra de buriti em resina epóxi.....	27
Figura 22 - Esquema do corpo de prova de Charpy e Izod (a) e pendulo instrumentado PANTEC (b).....	229
Figura 23 - Equipamentos de Ensaio: (a) termogravimétricos e (b) calorimétricos.....	30
Figura 24 - Espécimes DMA de compósitos de matriz poliéster incorporada com fração de volume diferentes de fibra de bananeira.....	31
Figura 25 – Carga de tensão típica versus diâmetro das fibras de juta para os intervalos distintos.....	33
Figura 26 – Gráficos de Weibull para os intervalos diferentes.....	34
Figura 27 – Variação da tensão característica com o diâmetro médio para cada intervalo.....	35
Figura 28 - Variação da força de tração média com o diâmetro médio para cada intervalo.....	36
Figura 29 - Micrografias em MEV da ruptura de fibras de juta, (a) mais fina, $d = 0,02$ mm e (b) mais grosso, $d = 0,19$ mm.....	37
Figura 30 - A curva de pullout, obtidos para a dependência da tensão com o comprimento da fibra embutida.....	39
Figura 31 - Aspectos típicos de fibras de juta:(a)antes do teste e (b)após o teste....	41
Figura 32 - Curvas típicas de tração, força versus alongamento. (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30% de volume de fibras.....	42
Figura 33 - Variação da tensão máxima (a) e módulo de elasticidade (b) vs função da fração volumétrica de fibra de juta.....	43
Figura 34 - Corpos de prova após o ensaio de tração para cada fração volumétrica de fibra de juta incorporada à matriz poliéster.....	44
Figura 35 - Fotomicrografias obtidas em MEV: (a) Superfície da resina pura; (b) perfil da resina pura; (c) superfície do compósito de 30% e (d) perfil do compósito de 30%.....	45

Figura 36 - Tração carga vs As curvas de alongamento para epóxi fração de volume de fibras de juta.....	46
Figura 37 - Espécimes de tração rompidos típicas de compósitos de epóxi com a fração de volume diferente de contínua e juta fibra alinhada.....	47
Figura 38 - Variação da resistência à tração (a) e módulo de elasticidade (b) com a fração de volume de fibras de juta em epóxi.....	48
Figura 39 - Micrografias de MEV de um composto epóxi com 30% de fração de volume de fibras de juta: (A) 50x e (b) 100x.....	49
Figura 40 - Curvas de carga vs. deslocamento dos ensaios de flexão de compósitos de matriz poliéster reforçados com diferentes frações de fibras de juta.....	50
Figura 41 – Variação da resistência à flexão dos compósitos de matriz poliéster com quantidade incorporada de fibras de juta.....	52
Figura 42 – Aspecto visual dos corpos de prova rompidos: (a) visão frontal; (b) visão lateral.....	53
Figura 43 – Micrografia obtida em MEV de compósitos de 30% de fibra de juta reforçados com resina poliéster: (a) 30X e (b) 100X.....	54
Figura 44 - Carga vs deformação para compósitos juta/epoxi com frações diferentes de fibras: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20% e (d) 30%.....	55
Figura 45 - Variação da tensão de flexão vs fração de fibras de juta.....	57
Figura 46 - Micrografia de compósito obtido em 30% de fibras de juta reforçado resina epóxi (a) e 50X (b) 150X.....	57
Figura 47 - Energia de impacto Charpy em função das diferentes frações em peso de fibra de juta.....	59
Figura 48 - Aspecto dos corpos de prova rompidos por impacto Charpy.....	60
Figura 49 - Superfície de fratura de impacto Charpy da amostra de poliéster puro (a) e compósito de poliéster reforçado com 20% de fibra de juta.....	61
Figura 50 - Energia de impacto de Charpy em função da fração de fibras de juta...62	
Figura 51 - Corpos de provas típicos rompidos por testes de impacto Charpy.....	63
Figura 52 - Superfície da fratura de impacto de Charpy, amostra de epóxi puro (0% de fibra): (a) vista geral; (b) Detalhe da fratura transversal do epóxi.....	64

Figura 53 - MEV da superfície de fratura de um corpo de prova de epóxi reforçado com 30% de fibras de juta. (a) 50 X e (b) 500 X.....	65
Figura 54 - Energia de impacto de Izod em função da fração de fibras de juta.....	66
Figura 55 - Típicas fraturas de corpos de provas por testes de impacto Izod.....	67
Figura 56 - Impacto superfície de fratura de um composto de poliéster reforçado com 30% de juta: (a) 30 X e (b) 500 X.....	68
Figura 57 - Energia de impacto de Izod em função da fração de fibras de juta.....	69
Figura 58 - Corpos de provas rompidos por testes de impacto Izod.....	70
Figura 59 - Impacto superfície de fratura de um composto epóxi reforçada com 30% de juta 30X.....	71
Figura 60 – Curva de TGA para a fibra de juta.....	72
Figure 61 - Curvas TGA e DTG de fibras de juta.....	74
Figura 62 - Curva de DSC para a fibra de juta.....	75
Figura 63 - As curvas TG/DTG da epóxi puro DGEBA/TETA.....	76
Figura 64 - Curvas TG / DTG de epóxi DGEBA/TETA reforçados com 10% em volume de fibras de juta.....	78
Figura 65 - Curvas TG/DTG de epóxi DGEBA/TETA reforçados com 20% em volume de fibras de juta.....	78
Figura 66 - Curvas TG/DTG de epóxi DGEBA/TETA reforçados com 30% em volume de fibras de juta.....	79
Figura 67 – Curvas de DMA para epóxi puro.....	81
Figura 68 - Curvas de DMA para os compostos de epóxi incorporados com o volume de 10% de fibras de juta.....	82
Figura 69 - Curvas de DMA para os compostos de epóxi incorporados com o volume de 20% de fibras de juta.....	83
Figura 70 - Curvas de DMA para os compostos de epóxi incorporados com o volume de 30% de fibras de juta.....	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos.....	13
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de fibras naturais e de fibras sintéticas usadas como reforço.....	21
Tabela 3 - Weibull parâmetro σ_n de resistência da fibra de juta no intervalo de diâmetro diferente.....	35
Tabela 4 - Pullout Média Resistência à Tração para cada comprimento de embutimento da fibra de juta.....	38
Tabela 5 - Propriedades de tensão de compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta.....	42
Tabela 6 - Propriedades de tração dos compósitos de epóxi incorporados com fibras contínuas e alinhadas de juta.....	47
Tabela 7 - Resistência à flexão e modulo de elasticidade para compósitos de poliéster reforçados com fibras alinhadas e contínuas de juta.....	51
Tabela 8 - Resistência à flexão e deslocamento de ruptura para os compósitos de fibra de juta.....	56
Tabela 9 - Energia de impacto Charpy para compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta.....	58
Tabela 10 - Energia de impacto Charpy para compósitos de epóxi reforçados com fibras de juta.....	62
Tabela 11 - Energia de impacto Izod para compósitos de poliéster reforçado com fibras de juta.....	65
Tabela 12 - Energia de impacto Izod para compósitos de epóxi reforçados com fibras de juta.....	68
Tabela 13 - Parâmetros termogravimétrica da epóxi puro DGEBA/TETA e compósitos com até 30% em volume de fibras de juta.....	77

RESUMO

O setor industrial vem cada vez mais necessitando de novos materiais que apresentem boa resistência e um custo menor, quanto comparado como os sintéticos. Os danos ambientais provocados por estes materiais sintéticos, conflitos relacionados com a utilização de formas não renováveis de energia, estão aumentando o interesse de se introduzir no mercado materiais naturais em substituição aos sintéticos, que apresentam um maior consumo de energia em sua fabricação e são mais caros e poluentes. A utilização de fibras naturais lignocelulósicas obtidas à base de vegetais e plantas estão sendo mais valorizadas como alternativa ambientalmente mais correta para substituir materiais não-recicláveis, que acarretam consumo elevado de energia, como as fibras de vidro em compósitos. Entre outras, essa fibra sintética apresenta um risco para a saúde quando inalado e sua produção está associada a emissões de CO₂, o principal causador do efeito estufa e responsável pelo aquecimento global. Nenhuma destas deficiências se aplica às fibras lignocelulósicas extraídas de plantas, que são renováveis, biodegradáveis e não favorecem, em média, a emissão de CO₂, por absorverem este gás durante todo o seu ciclo de vida. A fibra natural lignocelulósica de juta vem sendo extensivamente investigada em várias pesquisas, como compósitos poliméricos, por ela reforçados. Além de não causarem problemas ao meio ambiente, os compósitos reforçados com este tipo de fibra residual, podem substituir produtos de madeira, trazendo várias vantagens, como evitar a devastação florestal. Além disto, estes compósitos poliméricos podem ainda ser utilizados em materiais de construção e peças de automóveis. Entretanto, para que se tenha um compósito suficientemente rígido para competir com produtos convencionais, como as chapas de aglomerado de madeira, somente um percentual limitado da fibra de juta pode ser incorporado na matriz polimérica. Sendo assim, é investigado nesta tese materiais reforçados com fibra de juta, a fim de produzi-los com boa tenacidade e resistência. Foi observado neste trabalho que os compósitos confeccionados com a resina epóxi apresentaram melhores resultados do que os compósitos de resina poliéster.

ABSTRACT

It is a global reality that the industry is increasingly requiring new materials. Material showing good strength and a lower cost as compared to synthetics. Another aspect can't fail to mention is the environmental damage caused by these synthetic materials, conflicts over the use of non-renewable energy forms, are of increasing interest to market natural materials to replace synthetic materials, which have higher energy consumption in their manufacture and are comparatively more expensive and polluting. Engineering applications of natural lignocellulosic fibers obtained from vegetables and plants are valued as being more environmentally correct alternative to replace non-recyclable materials, which lead to high consumption of energy, such as glass fiber composites. Among others, this synthetic fiber presents a risk to health when inhaled and its production is associated with emissions of CO₂, the main greenhouse gas, responsible for global warming. None of these deficiencies apply to lignocellulosic fibers extracted from plants, which are renewable, biodegradable and do not contribute, on average, the emission of CO₂, by absorbing this gas throughout its life cycle. The lignocellulosic jute natural fiber has been extensively investigated in several studies, such as polymer composites, reinforced by it. In addition to not cause problems to the environment, the composites reinforced with this type of residual fiber, can replace wood products, bringing several advantages such as preventing forest devastation. Moreover, these polymer composites can also be used in building materials and automobile parts. However, in order to have a composite rigid enough to compete with conventional products such as sheets of wood shavings, only a limited percentage of jute fiber can be incorporated into the polymer matrix. Therefore, reinforced materials is investigated in this thesis of jute fiber in order to produce them with good toughness and strength. Obsevado was this work that made composites with epoxy resin showed better results than the composite polyester resin.

1. INTRODUÇÃO

A literatura define o compósito como sendo um material formado por dois ou mais materiais com características e aspectos diferentes, no entanto quando analisados macroscopicamente o mesmo é homogêneo, podendo possuir fibras longas ou curtas (Gay, 1991). A utilização de compósitos reforçados com fibras naturais é o reflexo das preocupações com as questões ambientais, como a poluição causada por resíduos que não são biodegradáveis ou não podem ser incinerados, bem como as mudanças climáticas devido às emissões de CO₂ associadas aos processos de utilização intensiva de energia e motiva também este trabalho o desenvolvimento auto-sustentável, já que as fibras naturais geram fonte de renda, principalmente nos países em desenvolvimento, onde grande parte são originárias, incentivando o cultivo à agricultura de não-alimentícios. Adicionalmente, vale também lembrar que estas fibras provêm de fontes renováveis, além de serem abundantes, de baixo custo e possuírem um conjunto relevante de propriedades mecânicas (Crocker, 2008).

Uma grande variedade de fibras naturais, obtidas a partir de plantas ricas em celulose, e denominadas como fibras lignocelulósicas, têm sido, nos últimos anos, não só investigadas, mas efetivamente aplicadas na engenharia de compósitos (Satyanarayana *et al*, 2007).

A fibra natural lignocelulósica de juta vem sendo extensivamente investigada em várias pesquisas, como compósitos poliméricos reforçados por juta (Wambua *et al*, 2007). Os compósitos reforçados com este tipo de fibra residual podem substituir produtos de madeira, trazendo várias vantagens, e ainda podem ser utilizados em materiais de construção e peças de automóveis (Zah *et al*, 2007).

Para que se tenha um compósito com propriedades capazes de competir com produtos convencionais, somente um percentual limitado da fibra de juta pode ser incorporado na matriz polimérica. Por outro lado as fibras de juta destacam-se devido à sua resistência específica relativamente alta. A finalidade desta pesquisa é desenvolver materiais compósitos com matriz de resina poliéster e epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas de juta, para aplicações em diversos setores, incluindo construção civil e indústria automobilística. Motivos sociais, econômicos e ambientais servem como motivação para o interesse nesta pesquisa (Monteiro *et al*, 2009).

2. OBJETIVO

Confeccionar corpos de prova de compósitos de poliéster e epóxi, reforçados com fibras contínuas e alinhadas de juta, com isso, estabelecer uma relação em matriz e fibra, que aperfeiçoe suas propriedades mecânicas.

- Avaliar as propriedades mecânicas e térmicas dos corpos de prova, com diferentes frações de fibra.

- Estudar os aspectos estruturais da fibra de juta e de seus compósitos em matriz poliéster e epóxi, através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

- Melhorar a eficiência da interação da interface entre fibra e matriz polimérica.

O objetivo central deste trabalho foi desenvolver novos materiais que possam ser utilizados a fins industriais ou alternativos, renovando, de forma opcional, a utilização de materiais nocivos ao ambiente.

2.1 JUSTIFICATIVA

A realização do presente trabalho é de grande relevância para os desenvolvimentos científicos, tecnológicos, econômicos e principalmente para o benefício do meio ambiente. O trabalho realizado com êxito poderá trazer grandes benefícios a toda a sociedade.

A necessidade de estudos mais profundos sobre as vantagens do uso de fibras naturais como reforço estrutural em compósitos poliméricos justifica a introdução deste trabalho no meio científico e tecnológico.

2.2 INEDITISMO

O estudo com fibras de juta foi realizado com a intenção de explorar as propriedades desta fibra, ainda pouco investigadas. Os ensaios realizados buscaram verificar as propriedades mecânicas, térmicas da fibra de juta e de seus compósitos, em matrizes poliméricas de poliéster e epóxi.

Sendo, então, realizadas análises térmicas, mecânicas e microestruturais das fibras e dos compósitos com frações diferentes de volume de juta. Um desempenho eficiente de novos materiais originados da fibra de juta em matriz polimérica significa uma maneira alternativa de causar menos danos ao meio ambiente e ao ser humano. Já que as fibras de juta utilizadas são materiais residuais, e seus compósitos não liberam CO₂ para atmosfera, não causando poluição do ar. Além de todos os processamentos com essas fibras serem extremamente mais fáceis, menos danosos os equipamentos e para a manipulação pelo homem, quando comparado às fibras sintéticas. .

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Fibras Naturais*

O uso de matérias-primas providas fontes renováveis vem sendo de extremo interesse em diversos estudos e pesquisas científicas, devido ao seu potencial na substituição de produtos sintéticos. As perspectivas para o uso de fibras naturais são muito grandes áreas como, por exemplo, a indústria têxtil, na indústria automobilística, na área de revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões e construção civil. Nos últimos anos, o uso de fibras naturais como curauá, coco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta e abacaxi como reforço em materiais poliméricos teve um acelerado crescimento (Araújo, 2003).

Por serem fonte de recurso natural renovável, as fibras naturais apresentam baixo custo, são biodegradáveis, recicláveis, não tóxicas e podem ser incineradas. Ao utilizá-las como reforço em polímeros pode-se substituir as fibras sintéticas como amianto, Kevlar, boro, carbono, nylon e vidro que, apesar de possuírem boas características mecânicas, apresentam um custo elevado, são abrasivas aos equipamentos de processamento, possuem alta densidade, não são biodegradáveis, geram produtos com alto custo de reciclagem, além do comprometimento com a saúde humana que essas fibras podem apresentar.

As fibras naturais apresentam suas estruturas de comprimento alongado de seção transversal vazada e arredondada, podem estar distribuídas por o todo vegetal, podendo ser classificadas de acordo com a origem anatômica como: fibras de talo, fibras de folha, fibras de lenho e fibras de superfície.

- Fibras de talo estão no floema que fica na entrecasca do talo, por exemplo, as fibras de rami, piaçava, linho, algodão e juta.
- Fibras de folha são retiradas das folhas dos vegetais, podemos citar as de abacaxi, sisal, palma, curauá, e banana.
- Fibras de lenho são extraídas do lenho como no caso as fibras de bagaço de cana-de-açúcar e bambu.
- Fibras de superfície formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas, como as fibras de coco, algodão e açai.

As fibras naturais são basicamente constituídas de lignina, celulose e hemicelulose, além de pequenas quantidades de sais inorgânicos, pectina, corantes naturais e substâncias nitrogenadas que são incluídos no que se denomina de fração de solúveis. A figura 1 representa de forma esquematizada as estruturas químicas da celulose, lignina e pectina.

A celulose se resume em um polímero linear cristalino formado por unidades β -D glicopironases unidas por ligações glicosídicas β -(1 \rightarrow 4). Os grupos laterais possuem reatividades distintas, o grupo C₁-OH é derivado da formação do anel através da ligação hemiacetal intramolecular, possui propriedades redutoras, enquanto que o C₄-OH é um grupo alcoólico não redutor. Os anéis de glicose adotam conformação mais estável em forma de cadeia com grupos hidroxila na posição equatorial, a formação das ligações hidrogênio entre os átomos adjacentes, oxigênio e hidrogênio, forçam o arranjo linear da macromolécula (Regiani, 2000).

Hemicelulose são moléculas complexas, amorfas e de unidades: β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glicose, α -L-arabinose, α -D-galactose, ácido β -D-glicurônico ou ácido α -D-4, O-metilglicurônico. Essas unidades são formadas por cadeias de carbono, com um grupo hidroxila ligado a cada átomo de carbono, exceto aqueles que podem estar na forma de carbonila ou em ligação hemiacetal. Tanto os grupos hidroxila quanto carbonila, são hidrofílicos, absorvem água, o que favorece a solubilidade de hemicelulose. Lignina é uma macromolécula formada por um sistema aromático, muito reticulado de elevado peso molecular, amorfo, composto de unidades fenilpropano. Pectina consiste em cadeia linear de unidades de α -D-ácidos galacturônicos, com graus variáveis de éster metílico (Regiani, 2000).

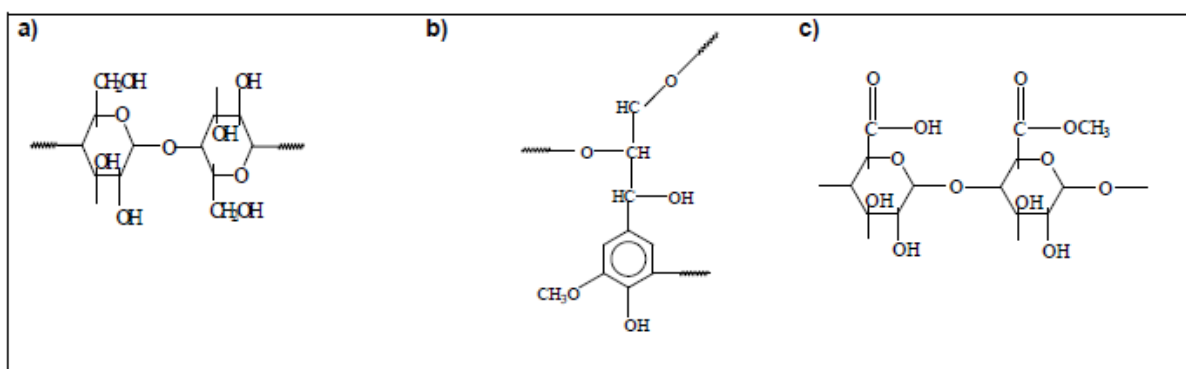


Figura 1 - a) celulose, b) lignina e c) pectina (Silva *et al*, 2009).

As fibras apresentam comprimento excessivamente maior que a largura, estes comprimentos são muito variados, fibras de lenho de coníferas podem chegar a 5 mm. Comercialmente, fibras são os filamentos constituídos de fixes de fibras-celulares, as fibras-celulares individuais são unidas entre si e com as partes vizinhas da planta por pectina.

Podemos observar na figura 2 (a) e (d) uma ilustração das plantas de sisal e algodão, na figura 2 (b) e (e) as seções transversais do talo de sisal e da folha de algodão, e na figura 2 (c) (f) feixes de fibras celulares. Das folhas de sisal são obtidos três tipos de fibras: fibras extraídas mecanicamente da beirada das folhas, fibras em tiras contendo cavidades vasculares extraídas do centro das folhas, e fibras de xilema, que são mais irregulares. As fibras mecânicas de sisal têm comprimento entre 1 e 1,5 m, e espessuras de 100 a 300 μm . As fibras comerciais de algodão têm comprimento entre 40 e 70 cm e espessura de 20 a 25 μm (Li *et al*, 2000).

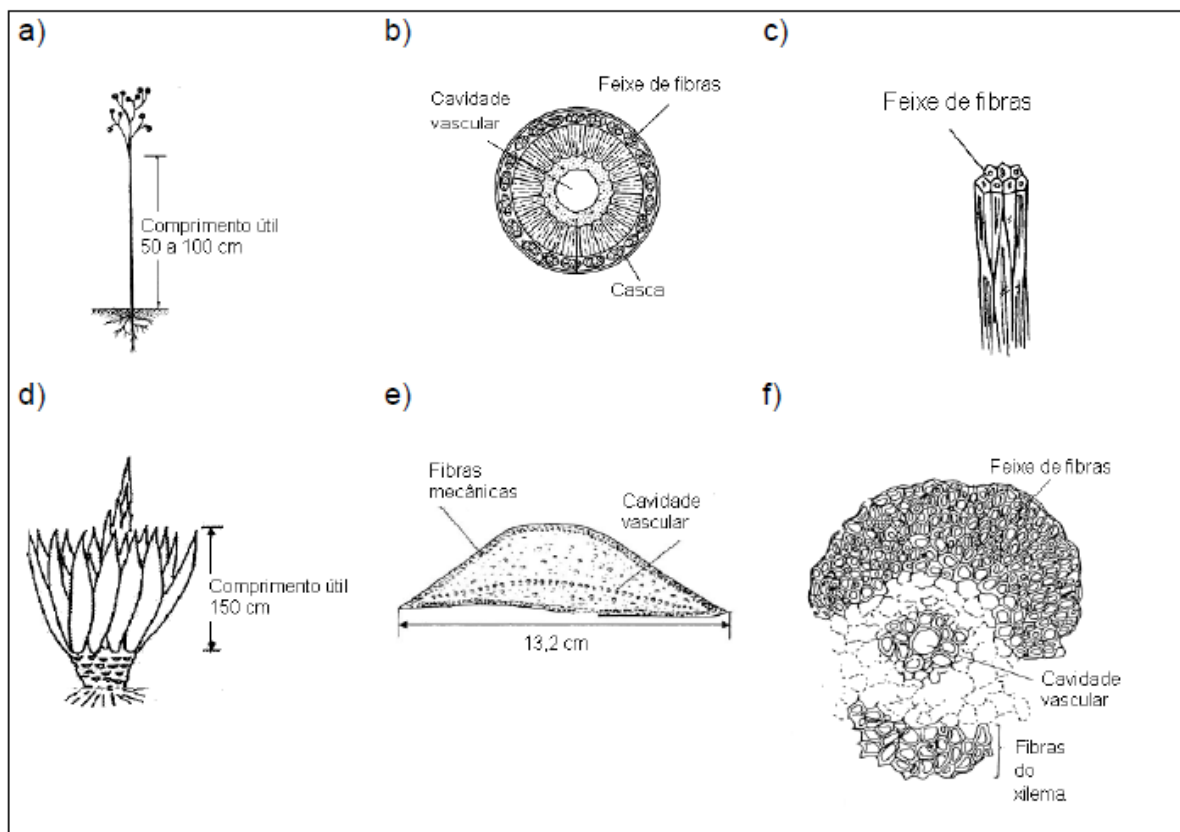


Figura 2 - a) talo do algodão de onde são retiradas as fibras, b) corte transversal do talo de algodão, c) feixe de fibras-celulares de algodão, d) folhas de sisal onde são retiradas fibras, e) corte transversal da folha de sisal e f) feixe de fibras-celulares de sisal (Li *et al*, 2000).

Cada fibra-celular individual tem estrutura complexa formada por paredes celulares que circundam o lúmen. Essas paredes recebem denominações sucessivas da parte externa para interna: primária, secundária, e assim por diante.

As paredes são constituídas de camadas formadas por feixes de microfibrilas que crescem no vegetal em forma de espiral, com diferentes orientações angulares.

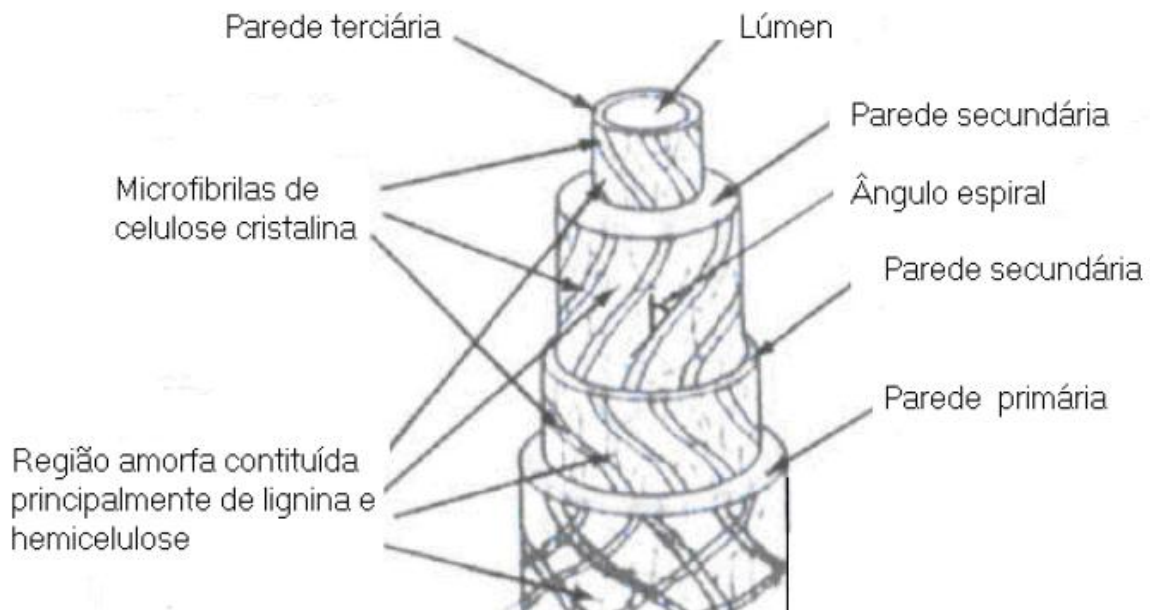


Figura 3 - Ilustração esquemática de uma fibra-celular (Silva *et al*, 2009).

Na figura 3 está representada uma fibra-celular, a qual pode conter regiões de seção transversal circular, oval ou achatada. O principal componente das microfibrilas é a celulose, estas estão interligadas por uma rede de moléculas de hemicelulose. A rede celulose-hemicelulose é permeada por pectinas. Outro importante constituinte das paredes é a lignina, substância hidrofóbica impregnada principalmente nas camadas próximas à superfície, e que tem função de sustentação. As microfibrilas são compostas por micelas as quais são cristais de moléculas de celulose na ordem de Angstroms, ordenadas paralelamente em diferentes estruturas alotrópicas.

Na figura 4 pode-se observar um feixe de microfibrilas, miscelas e uma estrutura cristalina de celulose.

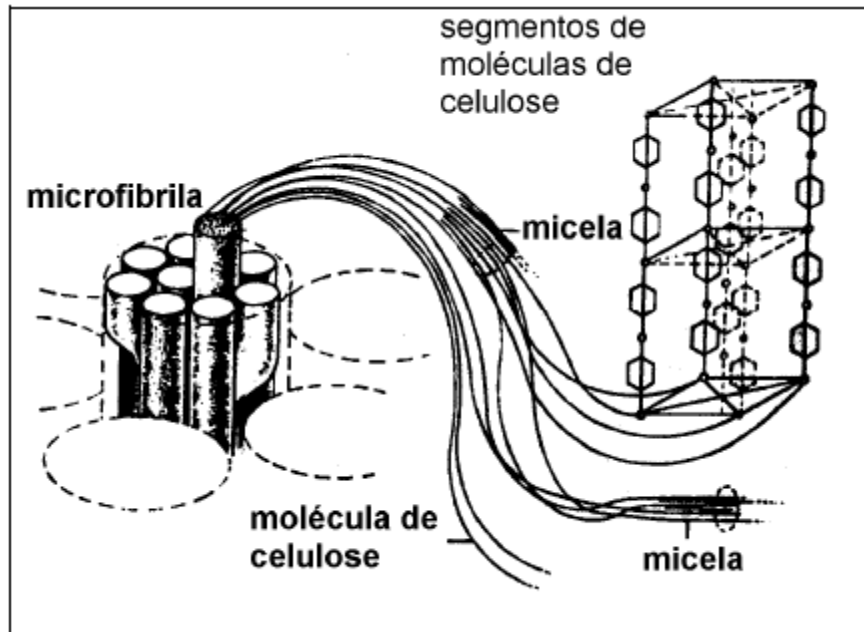


Figura 4 - Microfibrila constituída de porções cristalinas, micelas, que são formadas por segmentos de moléculas de celulose ordenadas (Raven *et al*, 2001).

Moléculas de celulosas possuem grandes tendências para formar ligações secundárias, formando ligações intermoleculares de ponte de hidrogênio, a figura 5 apresenta esta característica das moléculas de celulosas.

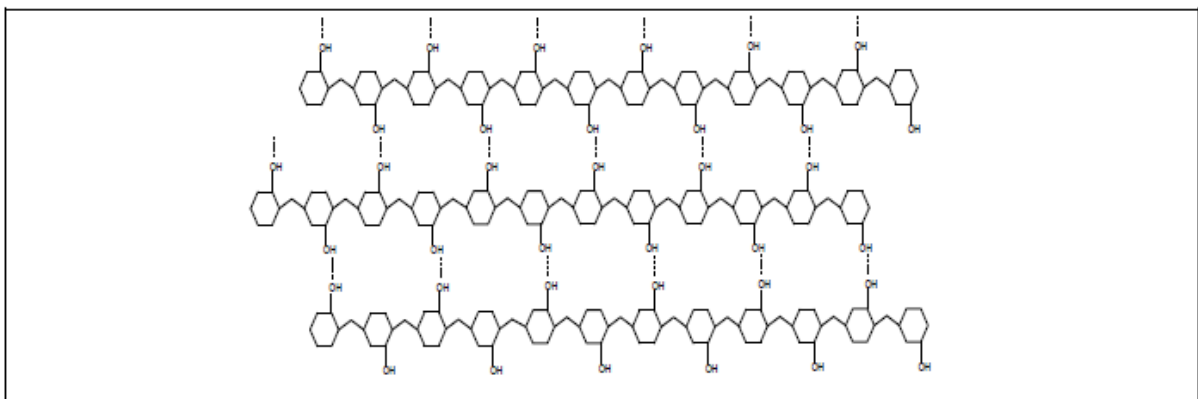


Figura 5 - Representação das ligações de hidrogênio que ocorrem nas moléculas de celulosas (Santos *et al*, 2012).

3.1.1 Fibras de Juta

Dentre as fibras naturais com potencial de aplicação, destaca-se a juta (*Corchorus capsularis*), cultivada em climas úmidos e tropicais na região norte do país, que produz uma fibra de alta resistência, que quando misturada a polímeros, pode dar origem a produtos com menor densidade, podendo apresentar grandes aplicações (Neto *et al*, 2007).

A fibra de juta possui baixo custo, abundância, maleabilidade e por apresentar, isoladamente, um bom conjunto de propriedades como, por exemplo, elevado módulo e resistência específica. Compósitos reforçados por essa fibra podem ser usados em telhados de casas populares, painéis e partes de carros, placas para indústria eletrônica, mesas e divisórias para escritório, orelhões, bancada para laboratórios, tanques de armazenamento, e outros (Mello *et al*, 1995).

A Juta, de nome científico *Corchorus capsularis*, é uma fibra têxtil vegetal que provém da família *Tilioidae*. Sua planta alcança um tamanho de 3 a 4 metros e o seu talo tem uma grossura de aproximadamente 20 mm. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo da maceração. A alta temperatura das regiões nas quais é cultivada favorece a fermentação e desta forma consegue-se a maceração em 8 a dez dias, permitindo assim a fácil retirada da casca da planta e separação da fibra da parte lenhosa do talo. O comprimento das células elementares da juta é em média de 0,80 mm, e o diâmetro varia de 0,01 a 0,03 mm, essa fibra também possui rigidez por ser lignificadas. O tempo necessário para maceração depende de vários fatores, como: temperatura da água, estado mecânico da água e idade da planta na ocasião da colheita (Alves, 2008).

A temperatura ótima para proliferação de bacilos úteis à maceração varia de 30 a 35 °C. O clima da Amazônia, sendo tropical, é muito favorável à maceração, de modo que o problema de temperatura baixa praticamente não existe. O estado mecânico também é importante. Estando à água em repouso a maceração é mais rápida porque a massa líquida se aquece mais facilmente e o volume de bacilos aumenta à medida que eles se reproduzem, visto não haver o arraste dos mesmos, o que não acontece na água em movimento onde não só a temperatura como a concentração de bacilos, deve ser menor sendo a maceração mais lenta. (Neto *et al*, 2007).

A fibra de juta tem como seu principal componente é a celulose, sob a forma de linho-celulose, tendo boa afinidade para corantes diretos e para corantes básicos. É muito higroscópica, regulando a umidade em 12%, o que a torna a matéria prima ideal para a 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 a utilização de agrotóxicos ou fertilizantes. Introduzida no Brasil por Ryota 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 (Alves, 2008).

A imigração japonesa na Amazônia promoveu uma singular experiência de desenvolvimento agrícola com a introdução das lavouras de juta nas várzeas do rio Amazonas e de pimenta-do-reino nas áreas de terra firme, ambas trazidas de possessões britânicas, como antítese da transferência da seringueira, levada pelos ingleses para as suas colônias na Ásia (Homma, 2005).

A lavoura de juta, figura 6 (a), atingiu seu auge na década de 1960, com mais de 50 mil agricultores envolvidos no seu plantio e representou mais de um terço do PIB (Produto Interno Bruto) do Estado do Amazonas, levando o Brasil a autossuficiência de fibra de juta em 1952. No entanto, torna novamente importador em 1970 e tem o seu gradativo desaparecimento na década de 1990 (Homma, 2005).

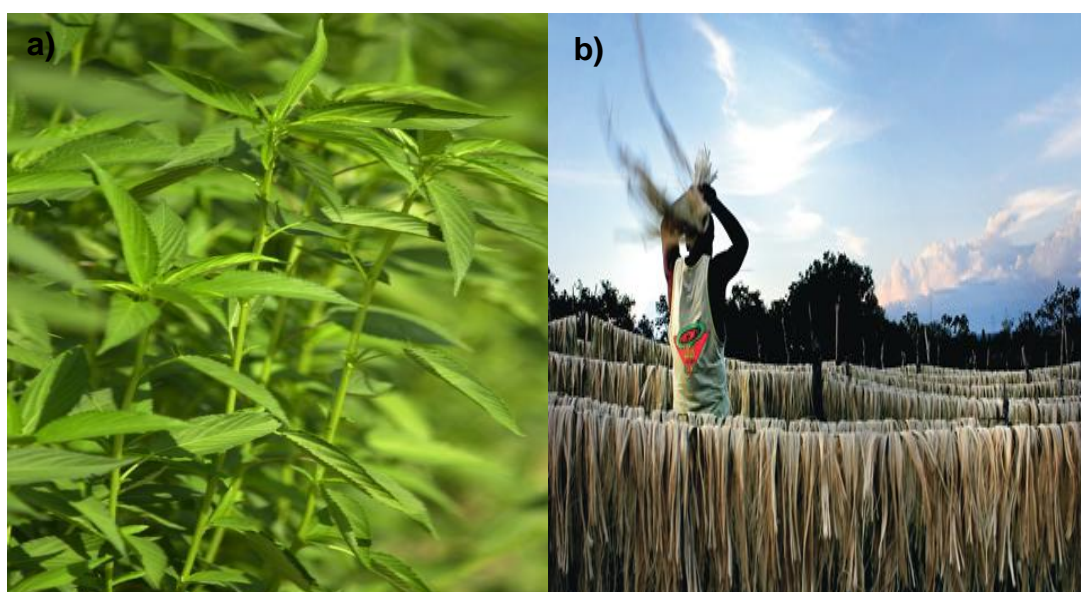


Figura 6 – a) Planta de juta e b) extração da fibra de juta (Homma, 2005).

3.2 Compósitos

Os compósitos compreendem uma classe de materiais que a cada dia ganha mais importância tecnológica sua preparação visa imprimir melhores propriedades aos materiais. Quando um material é preparado usando materiais de natureza distinta é denominado compósito. Uma prancha de surfe é um exemplo típico de um compósito onde fibras de vidro são embebidas em um polímero. O concreto que apresenta uma boa resistência à compressão e baixa resistência à tração pode formar um compósito com o aço, que tem boa resistência à tração (Bledzki *et al*, 2001).

A natureza também tem os seus próprios compósitos, a madeira apresenta suas células envoltas em lignina, que confere propriedades como elevada resistência ao impacto, à compressão e à dobra, fazendo com que a sua utilização pelo homem seja plena. Sendo um material multifásico, um compósito exibe além das propriedades inerentes de cada constituinte, propriedades intermediárias decorrentes da formação de uma região interfacial. O compósito se divide em duas fases, matriz (pode ser de cerâmica, polimérica ou metálica) e a fase dispersa (pode ser fibras ou partículas que servem como carga).

A matriz geralmente é um material contínuo que envolve a fase dispersa. As propriedades de um compósito são decorrentes de fatores como a geometria da fase dispersa, distribuição, orientação e também da compatibilidade interfacial entre os constituintes da mistura. É necessário que haja uma afinidade entre os materiais que foram unidos, pois devem trabalhar juntos respondendo aos esforços físicos do meio. Por isso é muito importante conhecer as propriedades químicas e físicas dos diferentes materiais que foram unidos. Como, as propriedades das interfaces destes materiais (Neto *et al*, 2007).

A adesão de um material a outro está associada ao estabelecimento de interações que podem ser dos tipos: ligações covalentes, forças de van der Waals, ligações de hidrogênio e interação eletrostáticas. A natureza destas interações está associada à afinidade química entre a matriz e a fase dispersa. Geralmente a fase dispersa apresenta natureza hidrofílica enquanto que a matriz polimérica tem natureza hidrofóbica. A compatibilidade destas duas fases pode ser melhorada através da modificação química da superfície de um dos componentes. A modificação da superfície pode ser feita por uma reação de derivatização, que

incorpora grupos na superfície capazes de interagir com a matriz. Como exemplos de derivatizações para cargas como as fibras vegetais, temos a mercerização (tratamento com NaOH), a esterificação, a acetilação, além de reações com agentes de acoplamentos como os silanos (Albinante *et al*, 2013).

Nas últimas décadas a busca por materiais ecologicamente corretos tem desenvolvido materiais de matrizes poliméricas com fibras naturais. A princípio as fibras naturais apresentaram poucas vantagens, pois geralmente as propriedades mecânicas são pioradas ou se mantêm quase inalteradas. No entanto a necessidade custos mais baixos faz permanecer o interesse por estas fibras, que são originadas de fontes renováveis, possuem baixa densidade, menor abrasão causada nas máquinas de processamento e também por terem a capacidade de boa adesão à matriz. Em compósitos reforçados por fibras, tem-se um mecanismo de reforço por transferência de tensões da matriz polimérica às fibras que, são mais resistentes e apresentam módulo mais elevado do que o da matriz. O uso destas fibras em compósitos estruturais tem crescido no setor industrial.

A utilização de materiais compósitos e alternativos vem sendo incrementada a cada dia, na medida em que se torna mais generalizada a conscientização de que o uso de recursos renováveis e não agressivos ao meio ambiente faz parte de um novo modelo ecologicamente correto. Os compósitos derivados de produtos vegetais, tanto na matriz como no reforço, inserem-se na política de aproveitamento de recursos renováveis, menos agressivos e tóxicos, visto que as matérias primas de origem vegetal, tais como: óleos, fibras, polímeros, corantes, etc., além de serem oriundas de fontes renováveis, atendem aos requisitos de biodegradabilidade e preservação do meio ambiente durante todo o seu ciclo de vida (Suh *et al*, 2000).

3.2.1 Compósitos Poliméricos

Os compósitos poliméricos podem ser termoplásticos ou termorrígidos. A principal diferença entre estes dois tipos está no comportamento característico quando aquecidos, isto é, os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldados várias vezes devido às suas características de se tornarem fluidos sob ação da temperatura e depois se solidificarem quando a temperatura diminui. Já os termorrígidos não tem o comportamento de fluidos devido à presença de ligações

cruzadas entre as cadeias macromoleculares. Na tabela 1 estão as principais características de polímeros termoplásticos e termorrígidos.

Tabela 1 - Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos
(Alexandre, 2006).

Termoplásticos	Termorrígidos
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura de uso limitada à Tg e Tm. Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

Os polímeros termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural em materiais compósitos por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como alta rigidez, elevada estabilidade térmica, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, resistência à fluência e relaxação. As resinas termorrígidas mais usadas e mais baratas são os poliésteres, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas; as quais são usadas principalmente para compor compósitos reforçados com fibras de vidro. As resinas epóxi são mais caras e além das aplicações estruturais, também são muito utilizadas em aplicações aeroespaciais por possuírem melhores propriedades mecânicas e melhores resistências à umidade do que os poliésteres, poliuretanos e as resinas vinílicas.

A escolha da matriz depende da aplicabilidade do compósito e das propriedades desejadas. Industrialmente, as matrizes de termoplásticos são mais viáveis, pelo número de peças que podem ser produzidas em curto espaço de tempo, com um número reduzido de mão de obra qualificada. Os polímeros termoplásticos, macromoléculas de cadeia linear ou ramificada, normalmente são fundidos durante o processamento e podem ser reciclados, pois fundem e retornam ao seu estado anterior sem degradação do material. Os termoplásticos, e por consequência os compósitos de termoplásticos, podem ser moldados por injeção, extrusão ou por outras técnicas de moldagem por aquecimento. As maiores restrições de peças de termoplásticos são as dimensões e o custo de equipamentos de processo, quanto maior a peça, maior susceptibilidade ao empenamento e mais caro o equipamento de processo (Albinante *et al*, 2013).

Os polímeros termorrígidos, macromoléculas de cadeia reticulada, são polimerizados durante o processamento, não podendo ser reciclados devido à decomposição térmica. Esses polímeros são comercializados principalmente para fabricação de compósitos, além de uso como adesivo e revestimento. O processamento desses compósitos pode ser realizado em moldes de simples confecção e a disposição dos constituintes pode ser feita à mão ou automaticamente. A cura ou endurecimento da resina pode ocorrer com ou sem auxílio de pressão, temperatura ou vácuo. As propriedades alcançadas por esses materiais consagraram o uso de compósitos. A produção desses materiais é limitada pelo tempo de produção. Ainda sim são muitos utilizados por apresentarem propriedades de resistência maiores (Alexandre, 2006).

Pode-se citar como exemplo de matrizes de termoplástico: polietileno, poliestireno e polipropileno; e de termorrígido epóxi, poliéster e poliuretano.

Um dos aspectos importante na manufatura de compósitos consiste na obtenção de adequada adesão fibra e matriz. Fatores como a determinação do comprimento crítico de fibras para determinada matriz, fração volumétrica de fibra nos compósitos influenciam na estabilidade de uma adequada interação entre fibra e matriz. O desempenho de compósitos reforçados por fibras depende de três diferentes fatores (Alexandre, 2006):

- A resistência e módulo da fibra.
- Resistência e estabilidade química da resina.
- Efetiva interação entre a resina e fibra para a transferência de esforços na interface.

Porém, a compatibilidade de uma matriz hidrofílica e uma fibra hidrofóbica ou vice-versa possui um papel importante na determinação das propriedades dos compósitos. Os materiais lignocelulósicos possuem grupos hidroxila polares na superfície, devido à celulose e à lignina, além de polioses, sendo que estes grupos podem, em princípio, interagir facilmente com matrizes poliméricas polares, como no caso das resinas fenólicas, utilizada no presente trabalho. Além disso, a presença de anéis aromáticos na matriz e na fibra (presente na lignina) pode também favorecer as interações fibra/matriz.

3.2.1.1 Resina poliéster

Resinas poliésteres constituem uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos utilizados, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular. A palavra poliéster tem o significado: poli, de muitos, e éster é uma função química; um éster é obtido através da reação de um ácido carboxílico com um álcool, tendo como produtos da reação um éster e água (RODRIGUEZ, 1996). Esta reação pode ser visualizada na figura 7.

Um dos poliésteres mais simples e mais importantes é obtido pela reação do éster metílico do ácido tereftálico com etileno-glicol. É usado como fibra têxtil e recebe os nomes de terilene ou dacron. A mistura deste poliéster com fibras como o algodão, seda e lã constitui o tergal. (RODRIGUEZ, 1996).

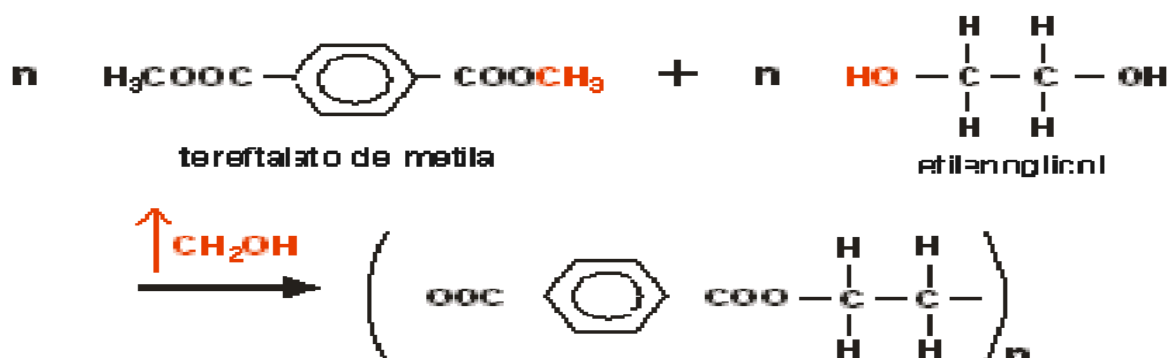


Figura 7 - Macromolécula de uma resina poliéster (Alessandro, 2003).

Os poliésteres insaturados são ésteres complexos formados pela reação de um diálcool e um anidrido ou ácido dibásico com liberação de uma molécula de água. Em virtude da reação ocorrer nas duas extremidades da cadeia, é possível ter moléculas muito compridas e obter-se uma multiplicidade de grupos éster. O poliéster insaturado é produzido quando qualquer dos reagentes contém insaturações. A insaturação do poliéster é fornecida, geralmente, pelo ácido ou anidrido maléico, assim como pelos seus isômeros, ácido fumárico. Os poliésteres insaturados podem ser formados em duas etapas, condensação do ácido e do álcool, para formar uma resina solúvel, e depois, adição de um agente de interligação, para formar uma resina termoestável. As duplas ligações foram

quebradas pela ação de um catalisador (peróxido orgânico, calor ou radiação), para reagirem novamente entre si, dando origem a um polímero tridimensional de características termoestáveis, e, portanto infusíveis e irreversíveis (SILAEX, 2006). Na figura 8 podemos observar uma macromolécula de um poliéster curado.

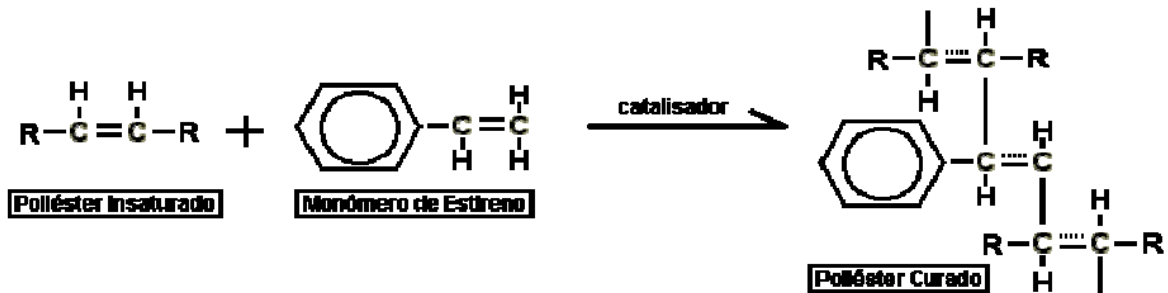


Figura 8 - Macromolécula de um poliéster curado (Alessandro, 2003).

3.2.1.2 Resinas epóxi

O grupo glicidil, figura 9, é usado como referência do grupo epóxi terminal, sendo o nome completado por éster, éter, amina, etc., de acordo com a natureza do grupo ligado ao terceiro carbono. A primeira resina comercial foi o produto da reação de epicloridrina e bisfenol A dando assim a resina mais comum conhecida como diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA).

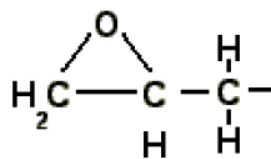


Figura 9 - Grupo Glidicil (Silaex, 2006).

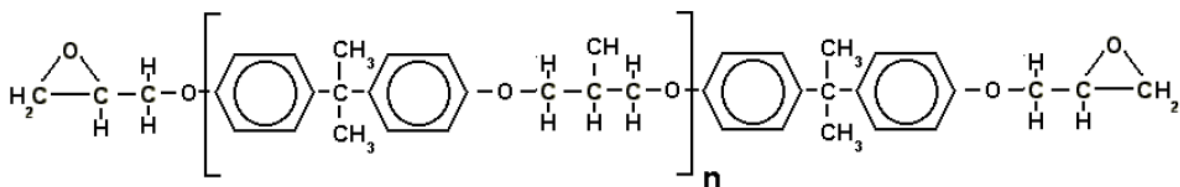


Figura 10 - Resina epóxi antes de ser catalisado, Bisfenol A (Silaex, 2006).

A figura 10 mostra a molécula da resina epóxi antes de ser catalisado podendo, dependendo do valor de n, ser líquida e até sólida sendo que a viscosidade aumenta conforme vai aumentando o valor de n. Com $n < \text{ou} = 1$ teremos resinas líquidas e $n > 1$ começará as resinas semi-sólidas e sólidas. As resinas epóxi são preparadas comercialmente por 3 (Três) métodos principais (SILAEX, 2006):

- Primeiro a dehidrohalogenação da cloridrina obtida pela reação da epicloridrina com adequado Di ou Polihidroxi ou qualquer outra molécula contendo hidrogênios ativos.
- Segundo a reação de olefinas com compostos contendo oxigênio, tais como peróxidos e perácidos.
- Terceiro a dehidrohalogenação de cloridrina obtidas por outros mecanismos diferentes dos primeiros.

Existem atualmente quatro tipos principais de resinas epóxi comercializados, são eles, resinas epóxi à base de bisfenol A são as mais utilizadas, pois são versáteis e de menor custo, proveniente da reação de Epicloridrina e Bisfenol A, podem ser líquidas, semisólidas ou sólidas dependendo do peso molecular.

A troca do Bisfenol A pelo Bisfenol F propicia as resinas epóxi maior cross-link e melhor desempenho mecânico, químico e térmico, principalmente quando curado com aminas aromáticas ou anidridos. Na figura 11 é um exemplo de resina epóxi à base de Bisfenol F.

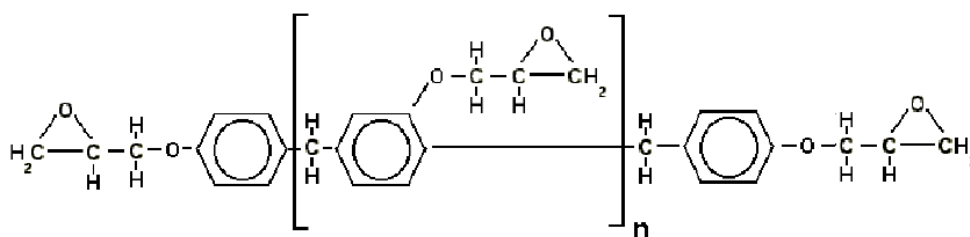


Figura 11 - Resina epóxi à base de Bisfenol F (Silaex, 2006).

Resinas epóxi bromadas são resinas à base de Epicloridrina, Bisfenol A e Tetrabromobisfenol A, com essas quatro moléculas adicionais de bromo, confere a característica de auto-extinguível. Usado na maioria para fabricação de venenos, esse produto é altamente inflamável (SILAEX, 2006). Na figura 12 tem-se um exemplo de uma resina epóxi bromadas.

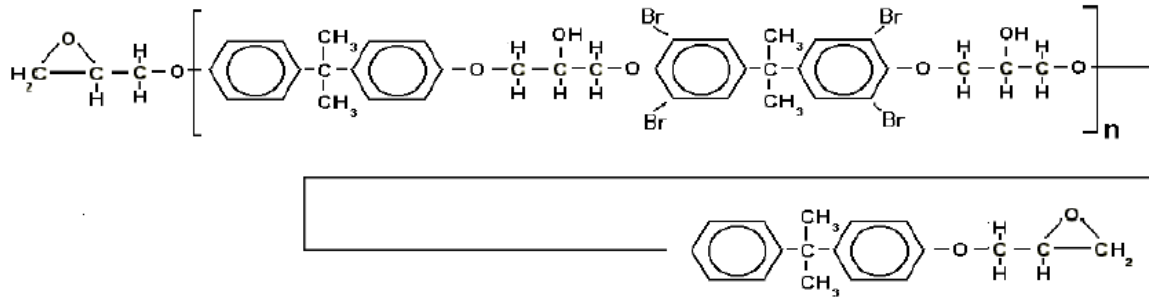


Figura 12 - Resina epóxi Bromadas (Silaex, 2006).

A flexibilidade encontrada em algumas resinas epóxi é devido possuírem longas cadeias lineares substituindo os bisfenóis por poliglicóis pouco ramificados, são resinas de baixa reatividade que normalmente são utilizadas como flexibilizantes reativos em outras resinas, melhorando a resistência a impacto com acréscimo da flexibilidade. As resinas epóxi flexíveis, figura 13, têm sido largamente utilizadas como polímero para composição de moldes devidos sua grande estabilidade dimensional, baixa contração, resistência térmica e resistências químicas e mecânicas (Alonso, 2013). Outra grande vantagem é à praticidade e facilidade de uso dos sistemas para confecção de moldes. Também utilizado largamente no setor de mármore e granito associado a agente de cura.

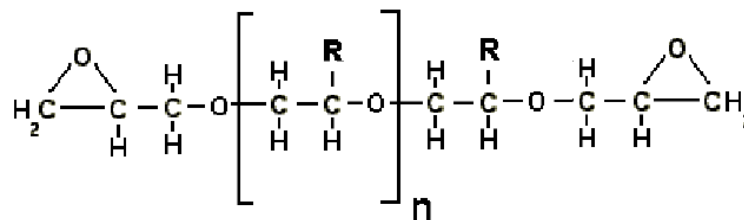


Figura 13 - Resina epóxi flexíveis (Alonso, 2013).

As resinas Epóxi são produtos obtidos por reações de condensação (na presença de hidróxido de sódio) entre a Epícloridrina e o Bisfenol A. A resina epoxídica mais utilizada é o éter de diglicidil bisfenol A (DGEBA). O resultado desta reação é um polímero de cadeia longa constituída de grupos epoxídicos em suas extremidades, apresentado na figura 14.

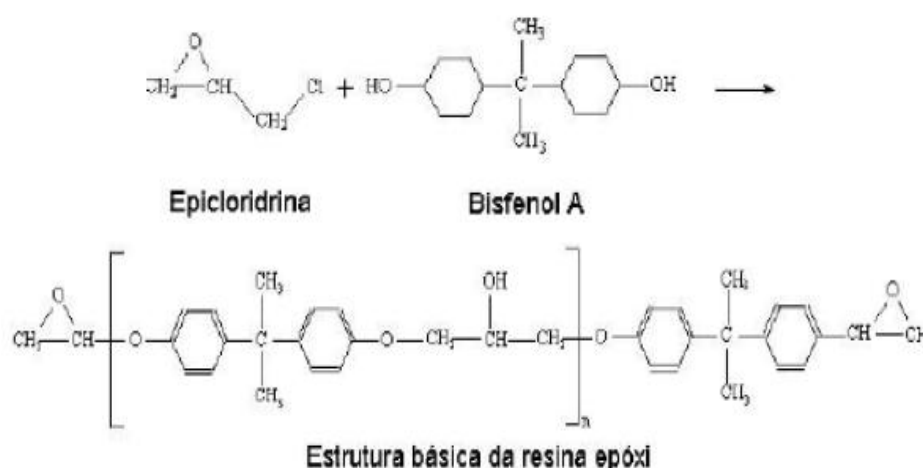


Figura 14 - Resina epóxi éter de diglicidil bisfenol A (Alonso, 2013).

É possível conseguir uma variedade muito grande de resinas com viscosidades que vão de líquidas até sólidas, variando seu peso molecular. Este tipo de resina apresenta características bastante interessantes no que se refere à interação química com outras resinas termoendurecíveis, fornecendo produtos finais com muito boas propriedades de resistência à abrasão, química, dielétrica, flexibilidade e aderência. As resinas epoxídicas não secam por si só e necessitam serem modificadas com certos ácidos graxos ou combinadas com agentes de cura, formando uma estrutura tridimensional por polimerização com alguns materiais, para formarem um filme sólido à temperatura ambiente.

3.2.2 Compósitos Reforçados com Fibras Naturais

Uma das mais importantes formas de materiais poliméricos são as fibras, que podem ser descritas como flexíveis, macroscopicamente homogêneas, com alta relação entre comprimento e seção transversal. As fibras podem ser classificadas de acordo com sua origem em fibras naturais e sintéticas.

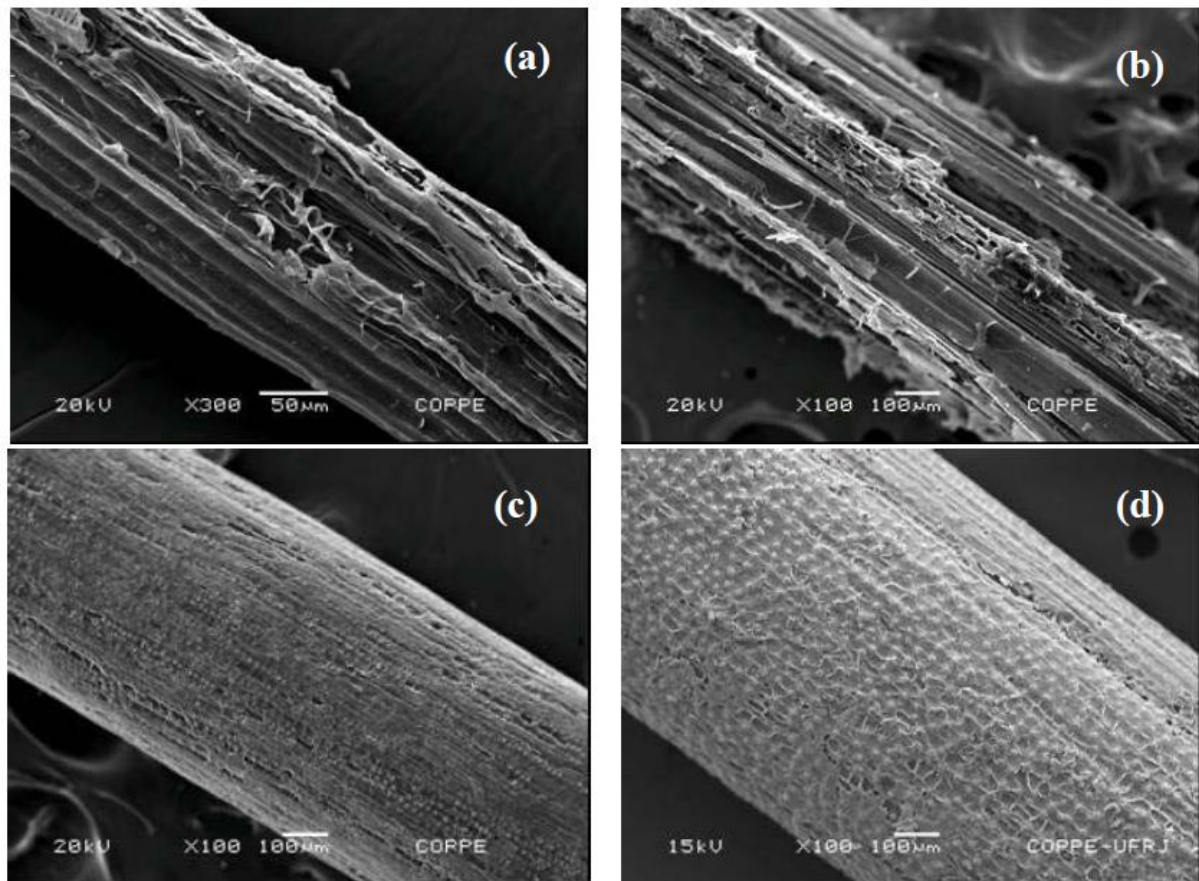


Figura 15 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fibras naturais lignocelulosicas: a) sisal, b) bamboo, c) coco e d) piaçava (Monteiro *et al*, 2010).

As fibras naturais são derivadas de animais, vegetais e minerais. As propriedades físicas de uma fibra dependem de sua estrutura química e cada uma tem seu próprio aspecto quando analisada e submetida ao microscópio, como na figura 15. As fibras naturais são bastante heterogêneas, pois dependem do tipo de solo, das condições climáticas, dos fertilizantes utilizados, do tipo de colheita, das folhas, dos frutos ou do caule dos vegetais.

Dentre os materiais compósitos, o reforço tipo fibra tem despertado grande interesse em engenheiros da indústria de diversos setores como automotiva, da construção mecânica, metalúrgica, farmacêutica, naval, aeronáutica, aeroespacial entre outras. Uma vez que a forma fibrosa de um material possui elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade, este tipo de material é usado atualmente como material de engenharia em combinação com uma matriz que, além de envolver e proteger a fibra deforma sob a ação de uma força e lhe distribui a tensão,

impedindo a propagação de falhas. A tabela 2 lista para algumas fibras naturais e sintéticas o módulo de elasticidade e resistência (Bledzki & Gassan, 1999).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas de fibras naturais e de fibras sintéticas usadas como reforço (Barbosa, 2011)

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Alongamento (%)	Resistência à Tração (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)
Coco	1,2	30,0	175	4,0 - 6,0
Algodão	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0	287 - 597	5,5 - 12,6
Juta	1,3	1,5 - 1,8	393 - 773	26,5
Linho	1,5	2,7 - 3,2	345 - 1035	27,6
Cânhamo	***	1,6	690	***
Rami	***	3,6 - 3,8	400 - 938	61,4 - 128
Sisal	1,5	2,0 - 2,5	511 - 635	9,4 - 22,0
Kraft ^a	1,5	***	1000	40,0
E-vidro ^b	2,5	2,5	2000 - 3500	70,0
Carbono (padrão)	1,4	3,3 - 3,7	3000 - 3150	63,0 - 67,0

a – Kraft de madeira leve; b – Fibra de vidro usada na indústria eletrônica (E).

Um critério decisivo para a escolha do tipo adequado de fibra é o seu módulo de elasticidade. Uma comparação entre os valores de resistência de diversas fibras naturais com relação os correspondentes às fibras de vidro mostrou que, por exemplo, os valores absolutos característicos das fibras tropicais eram de apenas metade do nível correspondente aos valores característicos da fibra de vidro. Contudo, devido ao fato de sua densidade ser aproximadamente 45% menor, as fibras naturais apresenta níveis de resistência específica comparáveis aos da fibra de vidro (Barbosa, 2011).

A densidade apresentada pelas fibras naturais é um forte aliado para a utilização destas fibras, pois possuem valores menores que as fibras sintéticas. Além disso, o custo das fibras vegetais é menor, são materiais de fonte renovável, biodegradável e não são abrasivas aos equipamentos como as fibras de vidro e carbono, como já mencionado antes. Segundo Wambua e colaboradores (2003) testes comparativos foram realizados entre algumas fibras vegetais (sisal, coco, etc.) e concluiu que as propriedades mecânicas das fibras vegetais testadas são comparáveis às propriedades conseguidas com a fibra de vidro sendo, em alguns casos, superiores. Este estudo sugere que os compósitos com fibras vegetais têm potencial para substituição das fibras de vidro.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 *Materiais Utilizados*

As fibras de juta investigadas no presente trabalho foram fornecidas pela firma Brasileira SISALSUL. A Figura 16 ilustra uma típica planta de juta e as fibras que são extraídas de seu caule.

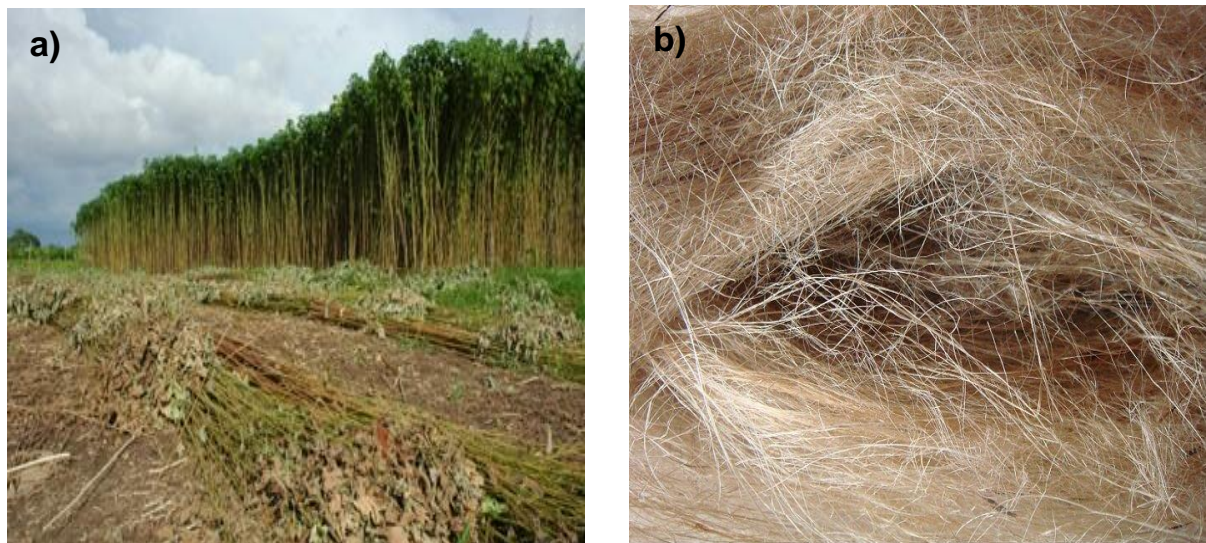


Figura 16 – Planta típica de juta (a) e as fibras já extraídas de seu caule(b) (Lima, 2009).

As fibras de juta foram processadas sem tratamento químico, sendo apenas limpas e postas para secagem. Para as matrizes dos compósitos foram utilizadas as resinas poliéster ortoftálica como relação para o endurecedor metil-etil-cetona de 5% em peso, e a resina epóxi do tipo éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA) e como catalisador trietileno tetramina (TETA) na proporção estequiométrica correspondente ao $\text{phr} = 13$ (13 partes de catalisador por 100 partes de resina), as duas resinas foram adquiridas da empresa Dow Chemical. A figura 17 ilustra as resinas armazenadas em recipientes plásticos.



Figura 17 – Resina epóxi (a) e resina poliéster cristal (b) (Fonte: própria).

4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da Fibra de Juta

As fibras de juta foram analisadas por MEV antes e após os ensaios, foram fixadas em um suporte metálico com fita de carbono e em seguida metalizadas com ouro para análise microscópica, o equipamento que foi usado é da Shimadzu, modelo SSX-550, localizado no LAMAV–CCT/ UENF, o modelo é ilustrado na figura 18, operando em uma voltagem de 15 kV para o feixe de elétrons secundários.



Figura 18 – Microscópio eletrônico de varredura (Fonte: própria).

4.3 Ensaios Mecânicos

Qualquer projeto de engenharia, especificamente o projeto de um componente mecânico, requer para a sua viabilização um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais disponíveis.

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de ensaios cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Dentre os fatores a serem considerados nos ensaios incluem-se a natureza da carga aplicada, a duração de aplicação dessa carga e as condições ambientais. A carga pode ser de tração, compressão ou cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou então flutuar continuamente. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma fração de segundo ou pode se estender por um período de muitos anos. Dentro das condições ambientais destaca-se também a temperatura como fator de grande importância (Callister, 2002).

4.3.1 Ensaio de tração da fibra (Weibull)

O lote como recebido das fibras de juta exibiu distinta variação de diâmetro. Então, um grupo de fibras aleatórias de juta foram selecionadas, deste grupo foi separados 6 faixas de diâmetros, para cada faixa 20 fibras foram impostas. A figura 19 ilustra um histograma com seis faixas para a fibra de bambu. A medida do diâmetro destas fibras foi feita através projetor de perfil, que realizou medições ao longo do comprimento da fibra em cinco locais distintos e uma média foi considerada.

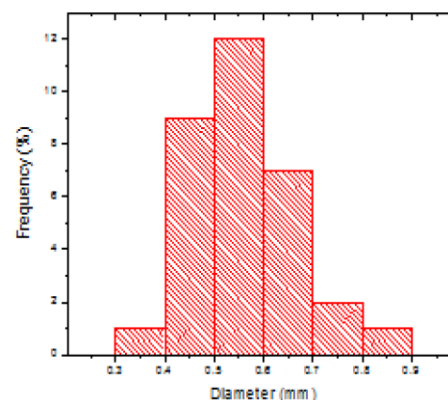


Figura 19 - Distribuição de freqüência por diâmetro para fibras de juta (Fonte: própria).

As fibras selecionadas foram, individualmente, ensaiadas na máquina Instron modelo 5582, com garras de tração. Cuidados especiais foram tomados para que evitem deslizamentos e com isso as fibras fiquem danificadas. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração para cada faixa de diâmetro foram processados pelo programa estatístico de análise de Weibull.

4.3.2 Ensaio de Pullout

As fibras foram utilizadas na sua condição como recebido, ou seja, sem qualquer tratamento de superfície. Antes do teste, as fibras foram limpas e secas a 60° C por 24 horas. Cada fibra individualmente terá seu diâmetro medido com precisão em um projetor de perfil em 5 pontos ao longo do seu comprimento. Para cada um desses pontos, o diâmetro foi medido em duas posições distintas com uma rotação de 90° para se obter as mais grossas e as mais finas dimensões. Desta forma, uma média dos diâmetro equivalente de cada fibra.

A tensão de arrancamento foi realizada segundo o método de Kelly e Tyson (1965), o esquema é mostrado na figura 20. Nessa figura, o comprimento L incorporado pela resina polimérica variou de 3 a 40 mm, a fim de gerar uma tensão de arrancamento (pullout) à tração versus curva L.

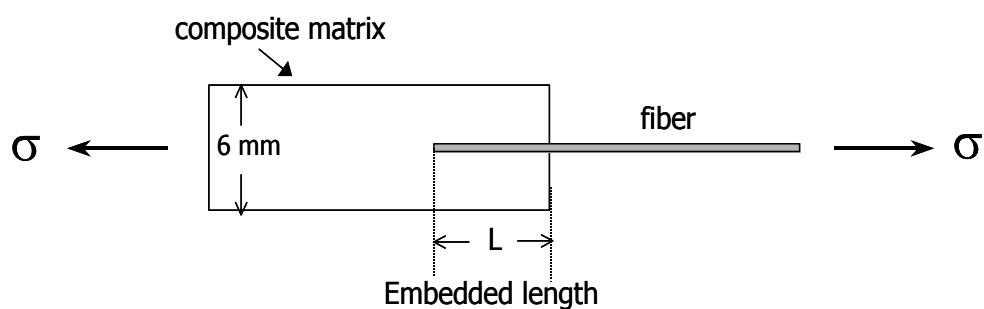


Figura 20 - Representação esquemática do ensaio de pullout (Silva, 2011).

O ensaio de pullout foi realizado em um modelo de máquina Instron 5582 com apertos ação pneumática, operando em temperatura ambiente com taxa de deformação de $6,7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. A pressão de exploração de 0,5 a 0,6 MPa foi aplicado através dos apertos pneumáticos. Um mínimo de 20 amostras foram testadas para cada valor de L. Os resultados da tensão de tração, σ , foram calculado por uma das seguintes equações, dependendo da condição:

- se a fibra sofrer fratura: $\sigma = 4F / \pi d^2$ (3)

- se a fibra desliza: $\sigma = F / \pi dL$ (4)

onde F é a força máxima, d o diâmetro equivalente da fibra e L o comprimento embutido. O comprimento crítico, l_c , avaliada pela curva de pullout permitiram o cálculo da força interfacial, τ_i .

$$\tau_i = \frac{r\sigma_f}{2l_c} \quad (5)$$

onde σ_f é a resistência de tração da fibra de juta.

4.3.3 Ensaio de Tração dos Compósitos

Com esse tipo de ensaio, pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até ser atingida uma carga máxima. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições para a variação dessa deformação em função da tensão aplicada.

Essa variação, extremamente útil para o engenheiro, é determinada pelo traçado da curva tensão-deformação a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos. A uniformidade termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estricção ou da diminuição da seção do corpo de prova, no caso de matérias com certa ductilidade (Dieter, 1988). A ruptura sempre se dá na região mais estreita do material, a menos que um defeito interno no material, fora dessa região, promova a ruptura do mesmo.

Para o ensaio de tração dos compósitos foram preparados corpos de prova com as resinas epóxi e poliéster e fibras de juta alinhadas em moldes feitos de silicone. Através do ensaio de tração dos compósitos foram avaliados a resistência a tração e módulo de elasticidade dos corpos de provas com diferentes frações volumétricas de fibras de juta. Na figura 20 pode-se observar corpos de prova de juta e resina epóxi. Os ensaios para os compósitos também foram realizados na máquina Instron modelo 5582.

Com o intuito de aumentar a resistência dos compósitos com fibra de juta, para este estudo foram feita uma seleção de fibras mais finas, aonde se espera elevar a superfície de contato da fibra e diminuir o numero de defeitos em sua superfície, melhorando assim a interface fibra/matriz.



Figura 21 – Corpos de prova de fibra de juta em resina epóxi (Silva, 2012).

4.3.4 Ensaio de Flexão de Fibras de Juta

As fibras de juta como recebida foram limpas e secas antes do uso. Os compósitos de 0, 10%, 20% e 30% em volume de fibras de juta alinhadas e contínuas foram fabricados através da acomodação das fibras em molde retangular de 152 x 122 x 10 mm e embebidas com a matriz polimérica preenchendo o molde até a fração de peso desejada, obtendo-se placas que serviram como corpos de prova.

A resina líquida comercial de poliéster e epóxi foram misturada com os seus respectivos catalisadores. Cada placa terá tempo de cura de 24 horas sob pressão de 0,5 MPa e pós-cura de 60°C por 4 horas. Após a cura, a placa foi dividida em seis amostras, sendo cada uma composta de 20 mm de largura. Estas amostras foram ensaiadas por flexão em três pontos em uma máquina Instron 5582, a velocidade do

ensaio de 5 mm/minuto e a relação da distância entre pontos de apoio para a espessura foi mantida em 9 cm.

A resistência à flexão, σ_f , e o módulo de flexão, E_f , foram calculados através das equações a seguir:

$$\sigma_m = \frac{3F_m L}{2bd^2} \quad (1)$$

$$E_m = \frac{L^3 F_m}{4bd^3 e} \quad (2)$$

onde na equação **F_m** é a força de resistência máxima, **L** a distância entre apoios, **e**, a extensão associada com a força máxima, **b** a largura e **d** a espessura do corpo de prova.

A superfície de fratura dos corpos de prova foi caracterizada, após cobertura com ouro, por microscopia eletrônica de varredura, MEV, em microscópio Shimadzu, modelo SSX-550 operando em uma voltagem de 15 kV para o feixe de elétrons secundários.

4.3.5 Ensaio de Impacto de Charpy e Izod de Fibras de Juta

Os compósitos de 0, 10, 20 e 30% de fibras de juta alinhadas e contínuas foram fabricados através da acomodação das fibras em molde retangular de 152 x 122 x 10 mm e embebidas com a matriz polimérica preenchendo o molde até a fração de peso desejada, obtendo-se placas que foram cortadas como corpos de prova. As placas de cada compósito foram então cortadas, segundo a direção de alinhamento das fibras em barras medindo 120 x 12 x 10 mm que serviram como base para confecção de 9 corpos de prova de ensaio de impacto Charpy, e com medidas de 62 x 12 x 10 mm para o ensaio Izod, de acordo com a norma ASTM D256, conforme esquema na figura 21 (a). Tanto o ensaio de Charpy quanto o ensaio de Izod foram realizados

Para a confecção do entalhe com 2,54 mm de profundidade e ângulo de 45° exigidos pela norma, figura 21(a), se utilizará um entalhador manual da marca

CEAST modelo Notchvas. Os corpos de prova foram ensaiados em um pendulo instrumentado PANTEC, figura 21 (b).

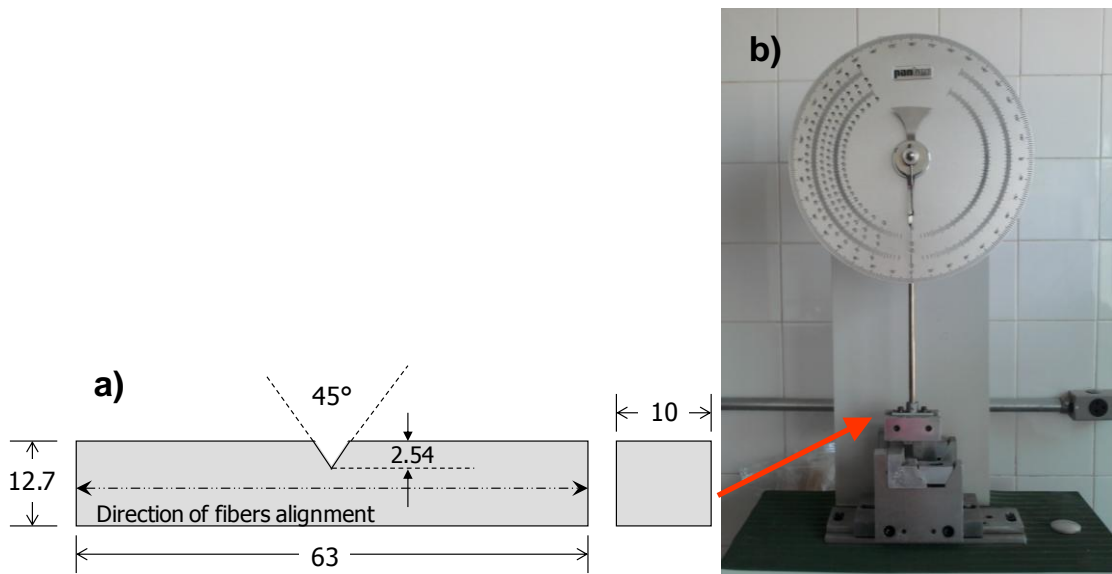


Figura 22 - Esquema do corpo de prova de Charpy e Izod (a) e pendulo instrumentado PANTEC (b) (Fonte: própria).

4.4 Análises térmicas

As análises térmicas envolvem uma série de técnicas que acompanham mudanças nas propriedades físicas ou químicas de materiais em função da temperatura. A análise térmica tem sido usada como uma ferramenta de controle de qualidade em três principais áreas: caracterização, processamento (otimização e monitoramento) e desenvolvimento de materiais.

4.4.1 TGA/DTG e DSC

O comportamento térmico das fibras de juta foram feito a partir da separação de 3 diferentes intervalos de diâmetro, obtidos a partir do histograma de distribuição

de diâmetro, mais finas, média e mais grossas. Já os compósitos foram preparados a partir de distintas frações volumétricas de fibra. Estas foram confeccionados com uma técnica especial, que consiste em colocar inicialmente fibras contínuas e alinhadas dentro de um molde cilíndrico com 5,5 mm de diâmetro e 20mm de comprimento, e em seguida preenchê-lo com a resina polimérica, e após 24 horas o corpo de prova foi retirado do molde e então foram realizadas análises de TGA/DTG e DSC. Pequenas pastilhas com 2 mg em peso, correspondendo a aproximadamente 1 mm de espessura e 0,6 mm de raio foi usado para cada uma das amostras. Para a confecção dos corpos de prova foram utilizadas as resinas poliéster e epóxi.

Foi utilizado o equipamento da TA Instruments Systems SDT 2960, para as análises termogravimétricas (TGA/DTG), figura 23 (a). Parâmetros utilizados: taxa de aquecimento de 10°C/min, partindo da temperatura ambiente até 650°C, em atmosferas de nitrogênio e oxigênio, com três repetições. Os ensaios de DSC foram realizados no equipamento de DSC da TA Instruments modelo 2910, figura 23 (b). Os parâmetros de ensaio usados foram os seguintes: a temperatura máxima dos ensaios variou ente -10°C e 190 °C. Taxa de aquecimento de 10°C/min, em atmosferas de nitrogênio e oxigênio.

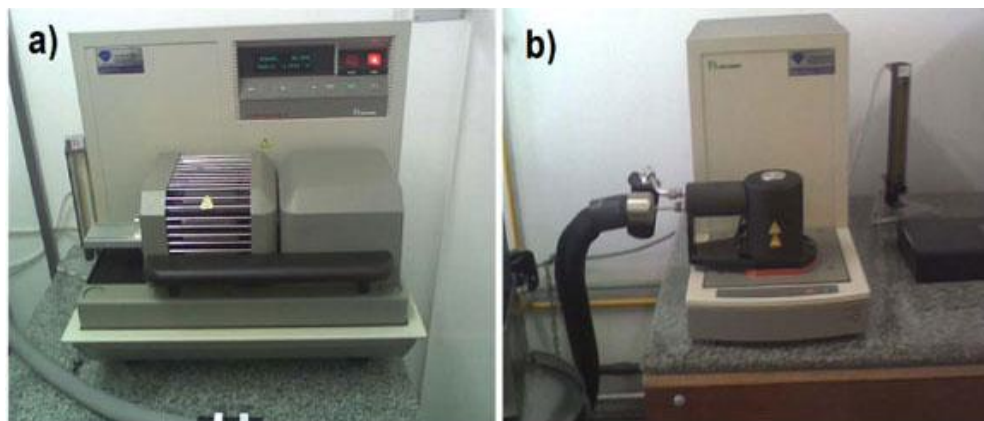


Figura 23 – Equipamentos de Ensaio: (a) termogravimétricos e (b) calorimétricos (Fonte: própria).

4.4.2 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

Para análise de DMA foram preparados corpos de prova retangulares, como representado na figura 24 com exemplo de corpos de prova de fibra de banana com

resina poliéster, medindo 50x13x5 milímetros foram fabricados para as análises. Inicialmente, as fibras de juta contínuas e alinhadas foram colocadas no molde de silicone com diferentes frações volumétricas. Cada amostra foi submetida a análise dinâmico-mecânico em um equipamento de DMA TA Instruments modelo operacional Q/800, em um modo de flexão de três pontos na 1 Hz de frequência e taxa de aquecimento de 3°C/min sob atmosfera de nitrogênio. As curvas do módulo de armazenamento, E' , módulo de perda, E'' , e $\tan \delta$, foram fornecidas pelo equipamento.



Figura 24 – Espécimes DMA de compósitos de matriz poliéster incorporada com fração de volume diferentes de fibra de bananeira (Rosa *et al*, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 *Análise de Weibull para Fibras de Juta*

Os dados digitais gravados obtidos a partir da máquina Instron permitiram a construção de curvas representativas. As curvas carga versus alongamento para cada intervalo de diâmetro, como os apresentados na figura 25. Nestas curvas pode se observar que todas mostram um segmento elástico linear até um máximo de carga em que ocorreu uma ruptura total. Isso indica que a fibra de juta é um material frágil, sem qualquer extensão de plástica depois do regime elástico. Além disso, as maiores das curvas apresentam intervalo de serrilhamento, especialmente para as mais finas, de diâmetro menor que 0,08mm. Este serrilhamento foi sugerido por Monteiro (2009) como ruptura parcial de fibrilas que compõem as fibras lignocelulósicas. Vale ressaltar que as fibras mais finas são compostas de relativamente de número menor de fibrilas, que resulta em um comportamento mecânico melhor.

Resultados de tração, tais como os exemplificados na figura 25 permitiram a avaliação da tensão da força para todas as fibras estudadas. Estes valores de resistência foram analisados pelo programa estatístico de análise de Weibull, em cada um dos sete intervalos de diâmetro. A Figura 26 mostra o gráfico de logarítmico versus parâmetros de localização, também conhecido como o gráfico de Weibull, nestes gráficos unimodais, com apenas um encaixe direto para todos os pontos no intervalo de mesmo diâmetro. Isso indica que todas as fibras de juta relacionadas com o mesmo diâmetro, distribuídas nos sete intervalos, pertencem a um grupo com o mesmo comportamento mecânico.

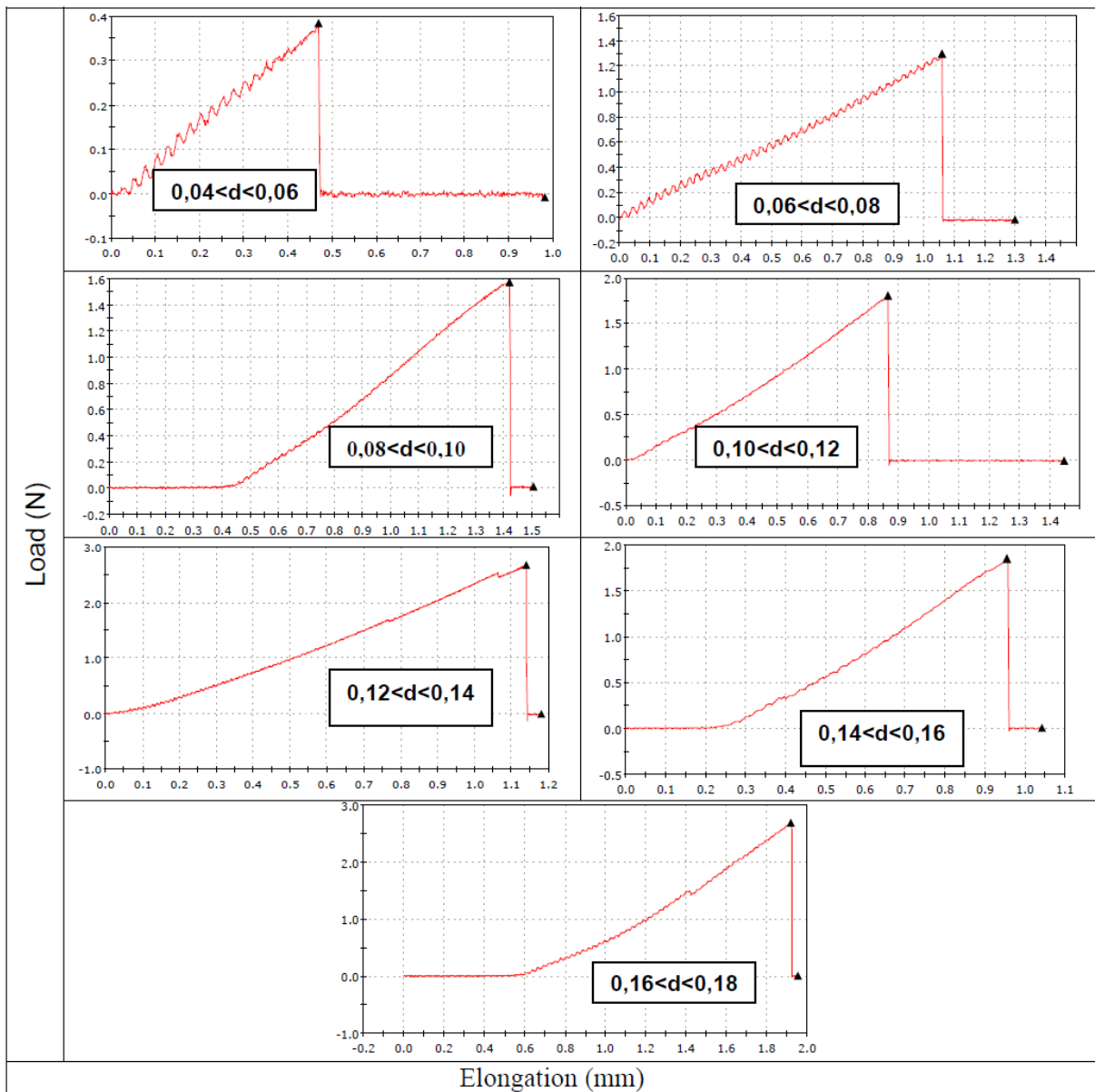


Figura 25 – Carga de tensão típica versus diâmetro das fibras de juta para os intervalos distintos.

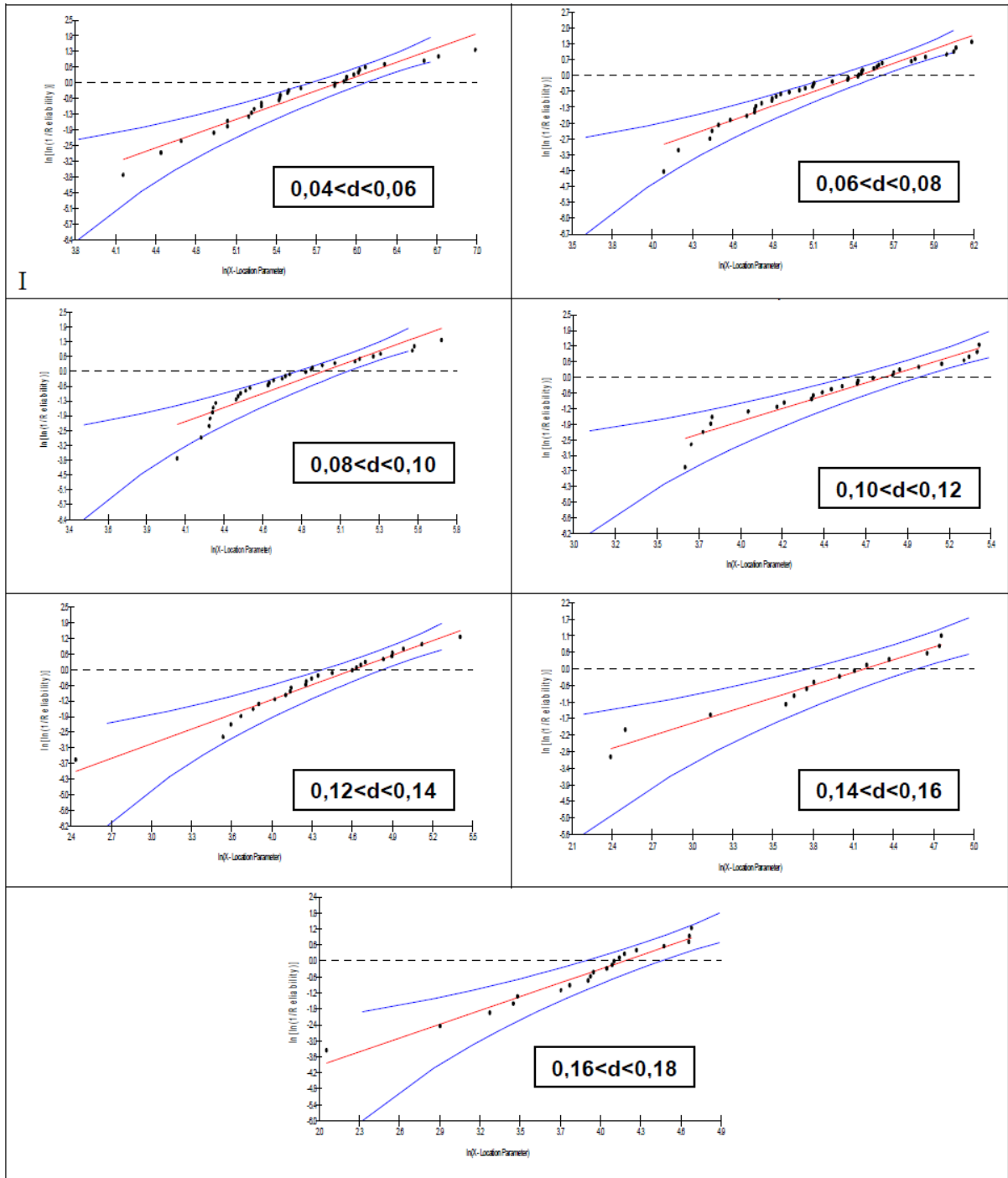


Figura 26 – Gráficos de Weibull para os intervalos diferentes.

A tabela 3 apresenta os valores do parâmetro de Weibull associado com a característica estatística de cada intervalo de diâmetro. Nesta tabela, o parâmetro θ na análise estatística deste trabalho representa a resistência característica à tração. O ajuste do parâmetro R^2 indica o grau de precisão da análise estatística (Monteiro *et al*, 2010).

Tabela 3 - Weibull parâmetro σ_n de resistência da fibra de juta no intervalo de diâmetro diferente.

Diameter Interval (mm)	Weibull Modulus β	Characteristic Strength θ	Precision Adjustment R^2	Average Tensile Strength (MPa)	Statistical Deviation (MPa)
0.04-0.06	1.82	364.1	0.949	323.7	184.7
0.06-0.08	2.20	228.0	0.938	201.9	96.7
0.08-0.10	2.53	144.8	0.860	128.5	54.4
0.10-0.12	2.15	119.5	0.933	105.8	52.6
0.12-0.14	1.88	97.5	0.959	86.6	47.8
0.14-0.16	1.48	67,7	0.964	61.2	42.1
0.16-0.18	1.77	66.9	0.967	59.6	34.7

A variação da resistência característica à tração com o diâmetro da fibra, ou seja, o valor médio do intervalo é mostrado na figura 27. Nesta figura há uma tendência clara para θ variarem uma relação inversa com relação ao diâmetro das fibras (d). Uma consequência física é que quanto mais fina a fibra maior a resistência característica à tração.

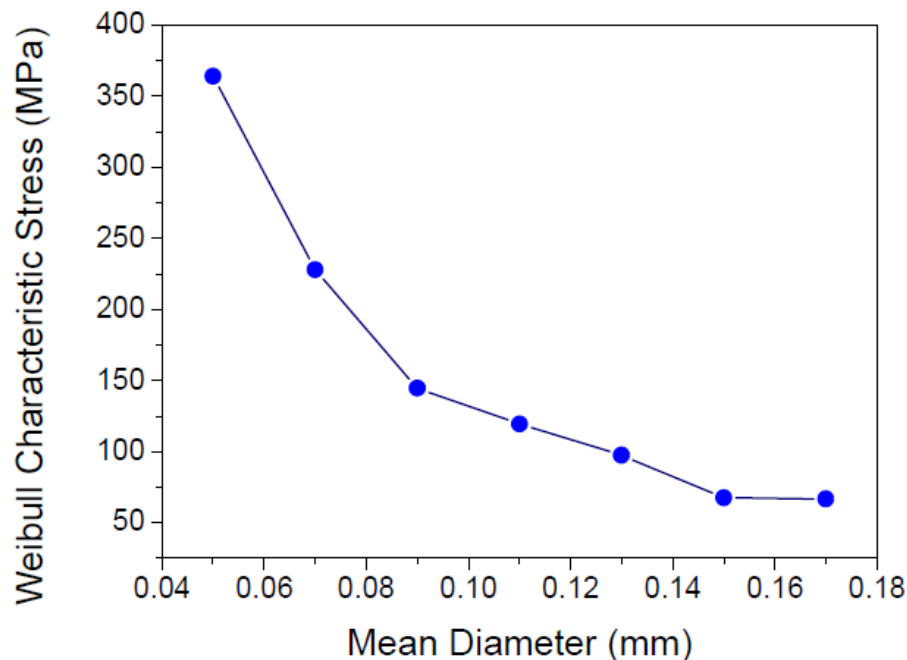


Figura 27 – Variação da tensão característica com o diâmetro médio para cada intervalo.

Os valores correspondentes de R^2 na tabela 3 estatisticamente apoiar a correlação inversa entre θ e d . Essa correlação pode ser descrito matematicamente como a seguinte equação hiperbólica para fibra de juta

$$\theta = 21 / d - 76 \quad (6)$$

Outro parâmetro de Weibull de relevância é a força média de tração, σ_m . O intervalo de σ_m e seu desvio abrangem os valores correspondentes de θ . Em uma distribuição normal força de tração, dentro de um intervalo determinado diâmetro, os valores de σ_m , θ e da média aritmética das forças devem coincidir. Na figura 28, uma correlação inversa hiperbólica pode ser ajustado entre σ_m (MPa) e d (mm):

$$\sigma = 20 m / d - 77 \quad (7)$$

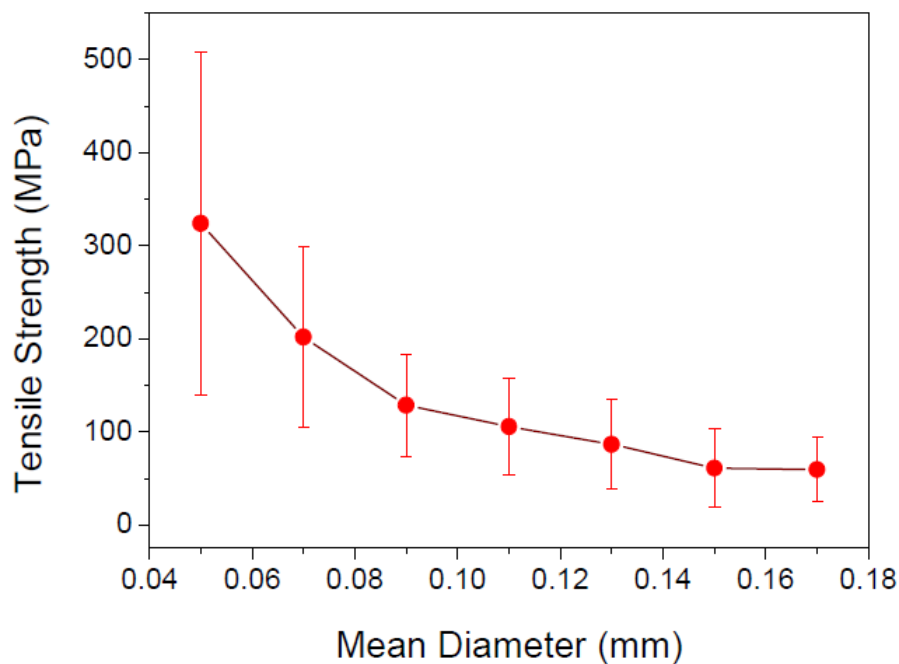


Figura 28 - Variação da força de tração média com o diâmetro médio para cada intervalo.

Comparando a Eq. (6) e (7), pode-se observar que ambas têm muito semelhantes coeficientes matemáticos. Sugere-se, então que a hiperbóle da equação é de fato a melhor estatística correlação entre a resistência da fibra de juta à tração e seu diâmetro. Correlações hiperbólicas têm sido relatadas

recentemente para o sisal, curauá, rami (Monteiro *et al*, 2010) e bem como também fibras de piaçava (Nascimento *et al*, 2010). A razão para esse comportamento aparentemente está relacionado com o mecanismo de fratura de tração de fibras lignocelulósicas.

A figura 29 mostra micrografias em MEV da elasticidade-ruptura das fibras de juta com diferentes diâmetros. Pode ser visto nesta figura que a mais fina fibra com $d = 0,02$ mm, figura 6 (a), mostra uma fratura associada com fibras menores. Pelo contrário, quanto mais espessa de fibra, com $d = 0,19$ mm, figura 6 (b), mostra uma fratura heterogênea compreendendo relativamente a mais fibrilas. Como consequência, há uma maior chance estatística de que a fibra de juta grossa seria prematura em sua ruptura com menor desgaste em fibras mais finas.

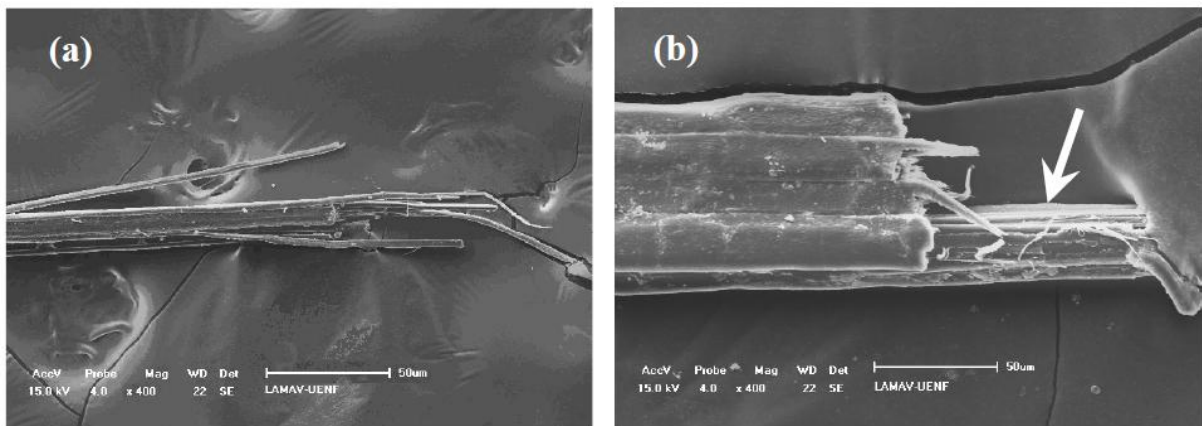


Figura 29 - Micrografias em MEV da ruptura de fibras de juta, (a) mais fina, $d = 0,02$ mm e (b) mais grosso, $d = 0,19$ mm.

Como observação final, vale a pena especular que uma correlação inversa entre da resistência à tração e diâmetro, como a hipérbole na Eq. (6) e (7) poderia, em princípio, permitir a escolha de fibras finas mais de juta como provavelmente a mais forte alternativa para reforçar compósitos com melhores propriedades.

5.2 Ensaio de Pullout Compósito Juta em Matriz Poliéster

Os resultados de mais de 100 ensaios de pullout são resumidos na tabela 4.

Tabela 4 - Pullout Média Resistência à Tração para cada comprimento de embutimento da fibra de juta.

<i>L (mm)</i>	<i>Resistência à Tração Pullout (MPa)</i>
3	171.2 ± 61.7
5	192.0 ± 150.7
10	183.2 ± 133.0
20	199.0 ± 206.0
30	207.6 ± 115.1
40	234.4 ± 124.5

Além dos testes de pullout, os resultados de ensaios de tração convencionais realizados em mais de 140 fibras de juta de outro trabalho (Bevitori *et al*, 2010) também foram consideradas. Nesse trabalho, a força de tração média de fibras de juta, semelhantes aos utilizados na presente investigação, variou 59,6-323,7 MPa, em função do intervalo de diâmetro da fibra. Utilizando os dados da Tabela 4, a variação da força de pullout com incorporado comprimento L da fibra é traçada na figura 30. Em associação com cada ponto nesta figura, o correspondente também são indicados os limites estatísticos. Na verdade, cada ponto corresponde a média e desvio padrão relacionado ao estresse obtidos a partir de mais de 20 testes individuais, para um dado L, e calculada pela equação (1) ou (2) de acordo com a fibra durante o teste de comportamento.

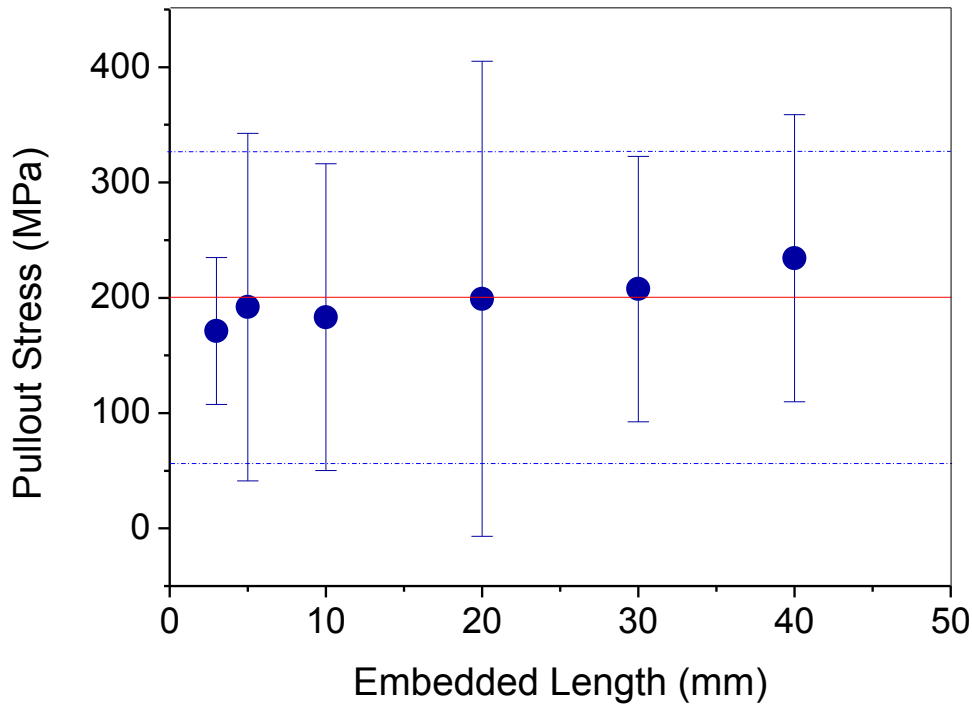


Figura 30 - A curva de pullout, obtidos para a dependência da tensão com o comprimento da fibra embutida.

A primeira coisa a se observar no gráfico da figura 30 é a grande dispersão relativamente associado com as falhas das fibras. Esta é uma consequência das características intrínsecas não-uniformes de qualquer fibra lignocelulósica (Satyanarayana *et al*, 2007). Não importa quão grande o número de amostras podem ser testadas para cada L, um grande desvio padrão seria sempre encontrado. Portanto, não é possível interpretar o resultado de pullout, tal como na figura 30 para as fibras de juta, da mesma maneira como para as fibras sintéticas (Yue *et al*, 1995). Em outras palavras, é difícil determinar um valor necessário para o comprimento crítico l_c , que a partir de parcelas, tal como na figura 30, para as fibras de juta incorporados no poliéster. Com efeito, como a L aproxima de zero, os valores da tensão de pullout ainda estão dentro da banda de 59,6-323,7 MPa (linhas horizontais a tracejado), correspondendo ao ensaio de tração convencional.

Testes de processamentos e limitações dificultam a realização de testes de pullout com valores para L menores que 3 mm. Portanto, é a interpretação proposta depois para a curva de teste de pullout na figura 30, tendo em conta os resultados obtidos. Obviamente, o comprimento crítico da fibra de juta em resina de poliéster

tem que ser inferior a 3 mm. Consequentemente, este valor pode ser considerado como um limite superior para o comprimento crítico.

$$\tau_i = \frac{r\sigma_f}{2\ell_c} \quad (8)$$

$$\ell_c = 3 \text{ mm} \quad (9)$$

Naturalmente, uma avaliação correta do comprimento crítico deve ser feito por menor comprimento considerando incorporado, que é difícil de fazer experimentalmente. No entanto, a grande dispersão no erro estatístico relativamente torna tal consideração de menor relevância. Com o limite superior de 3 mm, para avaliar limite inferior para a força interfacial, como dada pela Eq. (8). Para esta avaliação, o valor médio das fibras de juta foi investigada considerado como $r = 0,041$, de acordo com um trabalho anterior (Monteiro *et al*, 2010). Além disso, a resistência à tração da fibra de juta foi tomada como a média geral de $\sigma_f = 138,2$ MPa como fibra de juta empregado em outro trabalho. Mas, a força interfacial para fibra de juta incorporado em uma matriz de poliéster tornar-se:

$$\tau_i = 0.94 \text{ MPa} \quad (10)$$

Comparando este valor com os outros por fibras lignocelulósicas incorporados em matrizes poliméricas relatados na literatura (Sydenstricker *et al*, 2003), pode-se inferir que a interface relativamente fibra de juta / poliéster é fraca. Isto está de acordo com os resultados comuns encontrados (Crocker *et al*, 2008) quando as fibras lignocelulósicas estão reforçando compósitos de matriz de polímero. Como exemplos, a fibra de piaçava / poliéster pode chegar $\tau_i = 2,8$ MPa e do sisal / poliestireno tem $\tau_i = 2,2$ MPa. Pelo contrário, as interfaces de fibra sintética com matrizes poliméricas são comparativamente mais forte. Por exemplo, fibra de vidro / polipropileno tem $\tau_i = 5,2$ MPa e fibra de carbono / polipropileno, $\tau_i = 19,2$ MPa (Fu *et al*, 1999).

A figura 31 mostra, por MEV, o aspecto da fibra de juta antes e depois do teste. É importante notar a característica heterogênea da fibra, que é composta de muitos filamentos naturalmente ligados. Isto adiciona uma outra fonte de imprecisão para os testes de pullout.

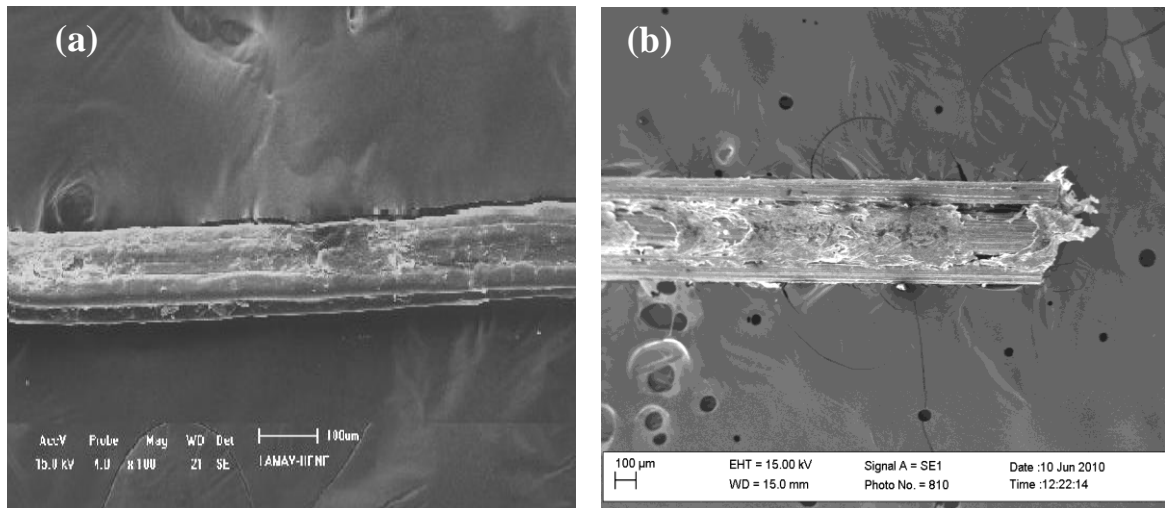


Figura 31 - Aspectos típicos de fibras de juta: (a) antes do teste e (b) após o teste.

Determinado experimentalmente o valor para o limite superior do comprimento crítico da fibra de juta / poliéster é de interesse prático. Uma vez que as fibras de juta naturalmente obtidas têm comprimentos que podem atingir 300 milímetros, então o comprimento crítico de 3 mm é muito menor do que a relação de aceite $l > l_c$ 15 (Callister, 1994), que defini uma fibra contínua. Conseqüentemente, as fibras de juta fornecidas manualmente normalmente agem com desempenho mecânico tão longo e contínuo de fibra, sendo melhor quando usada como reforço para compósitos poliméricos submetidos a carregar condições de rolamento.

5.3 Ensaio de Tração

5.3.1 Compósito de Poliéster Reforçado com fibras de Juta

Na figura 32 estão ilustradas curvas típicas de força versus alongamento de cada ensaio. As curvas representativas são ilustradas para cada fração de volume de fibras de juta. O aspecto comum é que todas as curvas dos compósitos apresentam praticamente nenhuma ou então pouca deformação plástica. A instabilidade no início da região linear da curva é uma conseqüência do ajustamento dos corpos de prova às garras de tração. A queda abrupta no final desta região linear indica que os compósitos de fibras de juta são materiais relativamente frágeis.

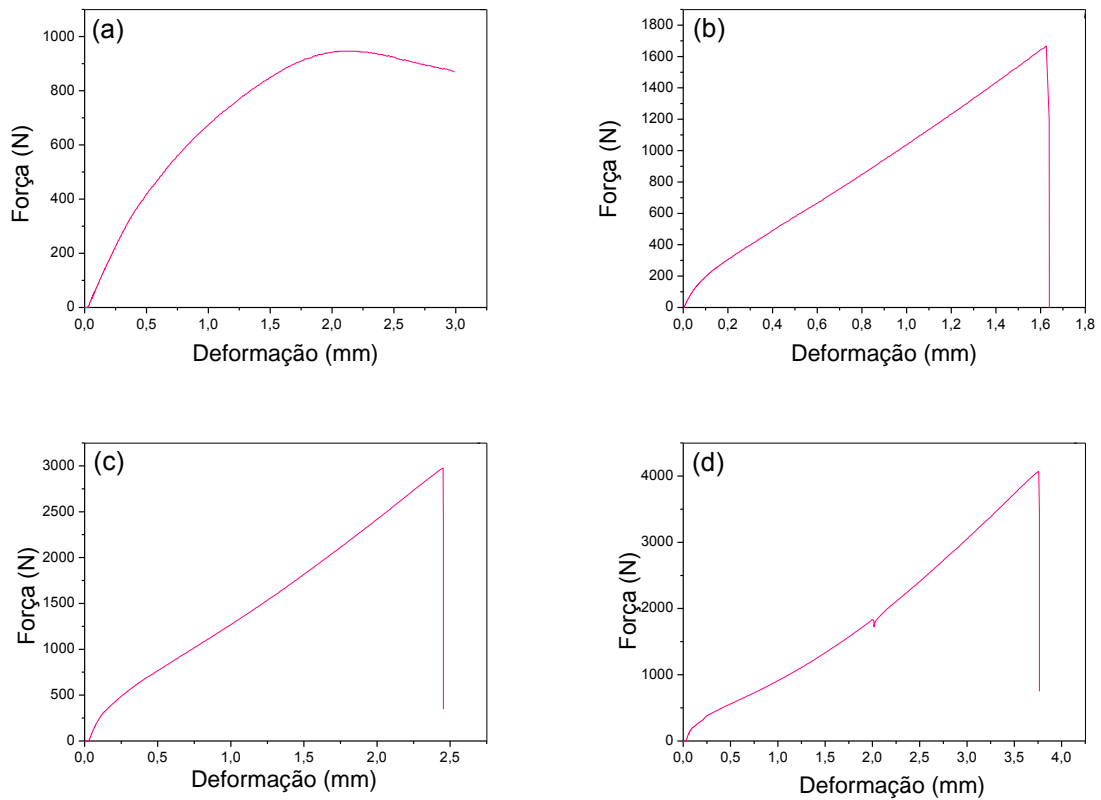


Figura 32 - Curvas típicas de tração, força versus alongamento.

(a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30% de volume de fibras.

A partir das curvas de força versus alongamento, calculou-se a tensão máxima e o módulo de elasticidade. A tabela 5 apresenta os valores médios para essas propriedades de tração para diferentes volumes de fibras de juta.

Tabela 5 - Propriedades de tensão de compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta.

Volume de fibras de juta (%)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Total (%)
0	31,26 ± 3,28	0,446872 ± 0,060	0,071 ± 0,0081
10	62,49 ± 5,66	0,983130 ± 0,070	0,064 ± 0,0082
20	68,80 ± 13,86	0,798627 ± 0,084	0,086 ± 0,0139
30	56,58 ± 18,08	0,612499 ± 0,159	0,093 ± 0,0238

A figura 33 mostra os gráficos de tensão máxima e módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibras de juta. Nestas figuras nota-se que a

resistência do compósito à tração aumenta significativamente com a incorporação de fibra de juta à matriz de poliéster. Por outro lado a rigidez aumenta quando comparada à resina pura, porém o compósito de 10% de volume de fibra apresentou maior módulo de elasticidade em relação às demais frações volumétricas.

Estes resultados indicam que a utilização de fibras de juta em compósitos de resina poliéster proporciona um efetivo reforço na resistência à tração destes materiais.

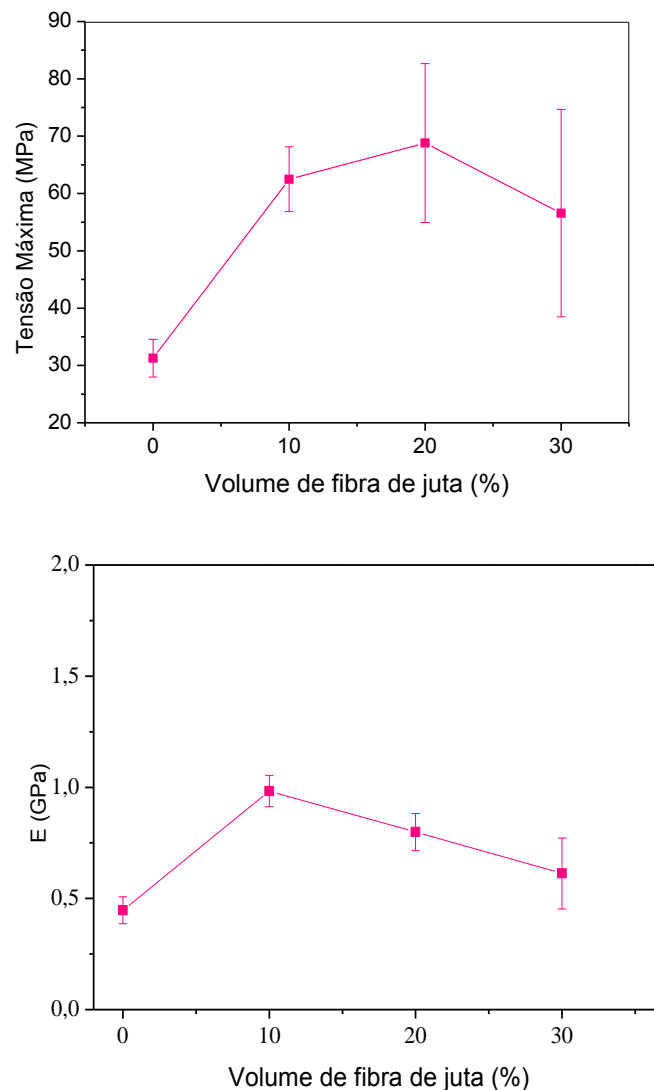


Figura 33 - Variação da tensão máxima (a) e módulo de elasticidade (b) vs função da fração volumétrica de fibra de juta.

A análise da fratura dos corpos de prova ensaiados em tração foi realizada tanto por observação macroscópica quanto por microscopia eletrônica de varredura

(MEV). A figura 34 ilustra o aspecto macroscópico das fraturas dos diferentes corpos de prova. A ruptura dos compósitos indica uma mudança inicial de ruptura transversal, até 10% de fibra, para uma propagação, orientada por tração, longitudinal através da interface relativamente fraca fibra-matriz, para 20 e 30% de fibra. A razão para esse mecanismo de ruptura não uniforme pode ser associado com a excepcional resistência à tração das fibras de juta que pode chegar a mais de 1000 N. Assim, para frações acima de 10% de fibra, trincas propagadas na frágil matriz de poliéster, são bloqueadas pelas fibras de juta. Este mecanismo provoca delaminação longitudinal na estrutura dos compósitos.



Figura 34 - Corpos de prova após o ensaio de tração para cada fração volumétrica de fibra de juta incorporada à matriz poliéster.

A figura 35 mostra fotomicrografias obtidas por MEV da resina pura e de um compósito reforçado com 30% de fibra. Nesta figura, observa-se que para o corpo de prova sem adição de fibra ocorre propagação de poucas trincas, rompendo de maneira frágil o corpo de prova. Para o compósito pode-se ver que as trincas propagam-se pela superfície da fibra, estando estas aderidas à matriz, o que justifica um aumento significativo sobre a resistência e rigidez dos compósitos. Pode ser observar também a evidência de vazios correspondentes ao desprendimento da fibra em relação à matriz.

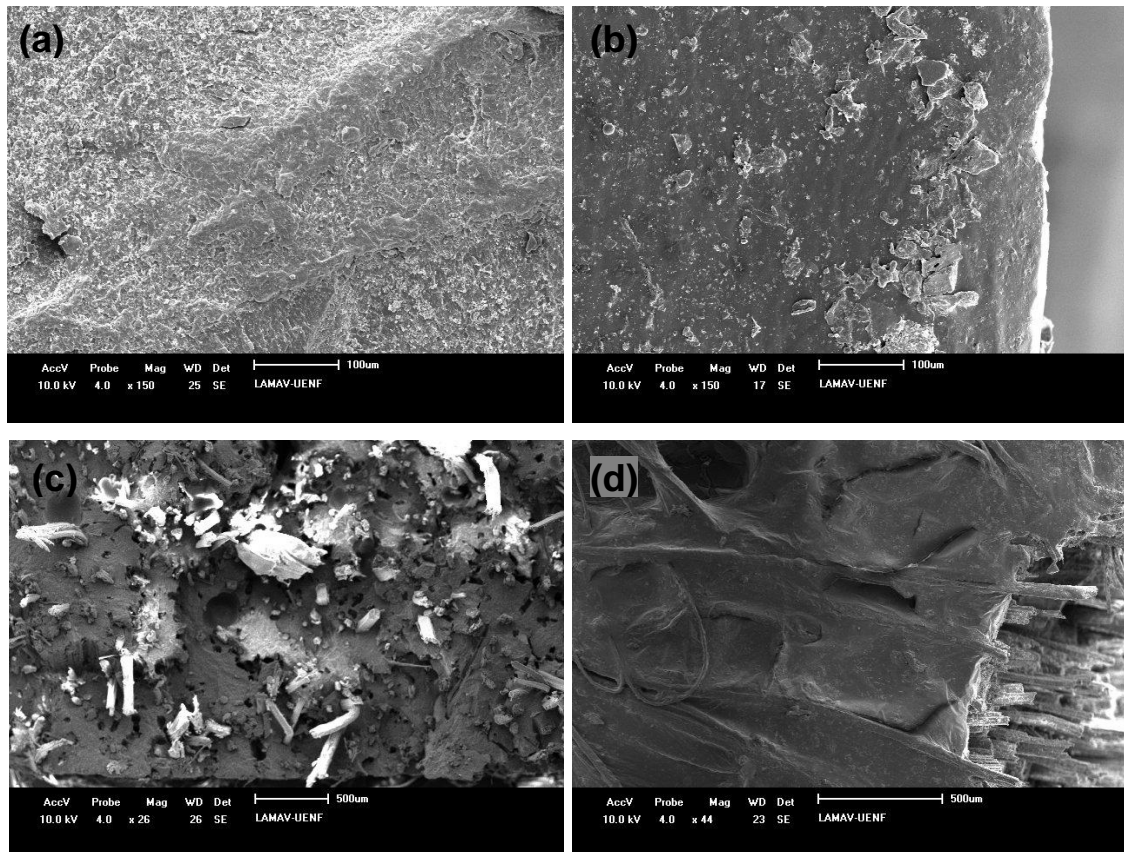


Figura 35- Fotomicrografias obtidas em MEV: (a) Superfície da resina pura; (b) perfil da resina pura; (c) superfície do compósito de 30% e (d) perfil do compósito de 30%.

5.3.2 Compósito de Epóxi Reforçado com Fibras de Juta

Exemplos de tração versus carga As curvas de alongamento para espécimes de volume distinto fração compósitos são mostrados na figura 36.

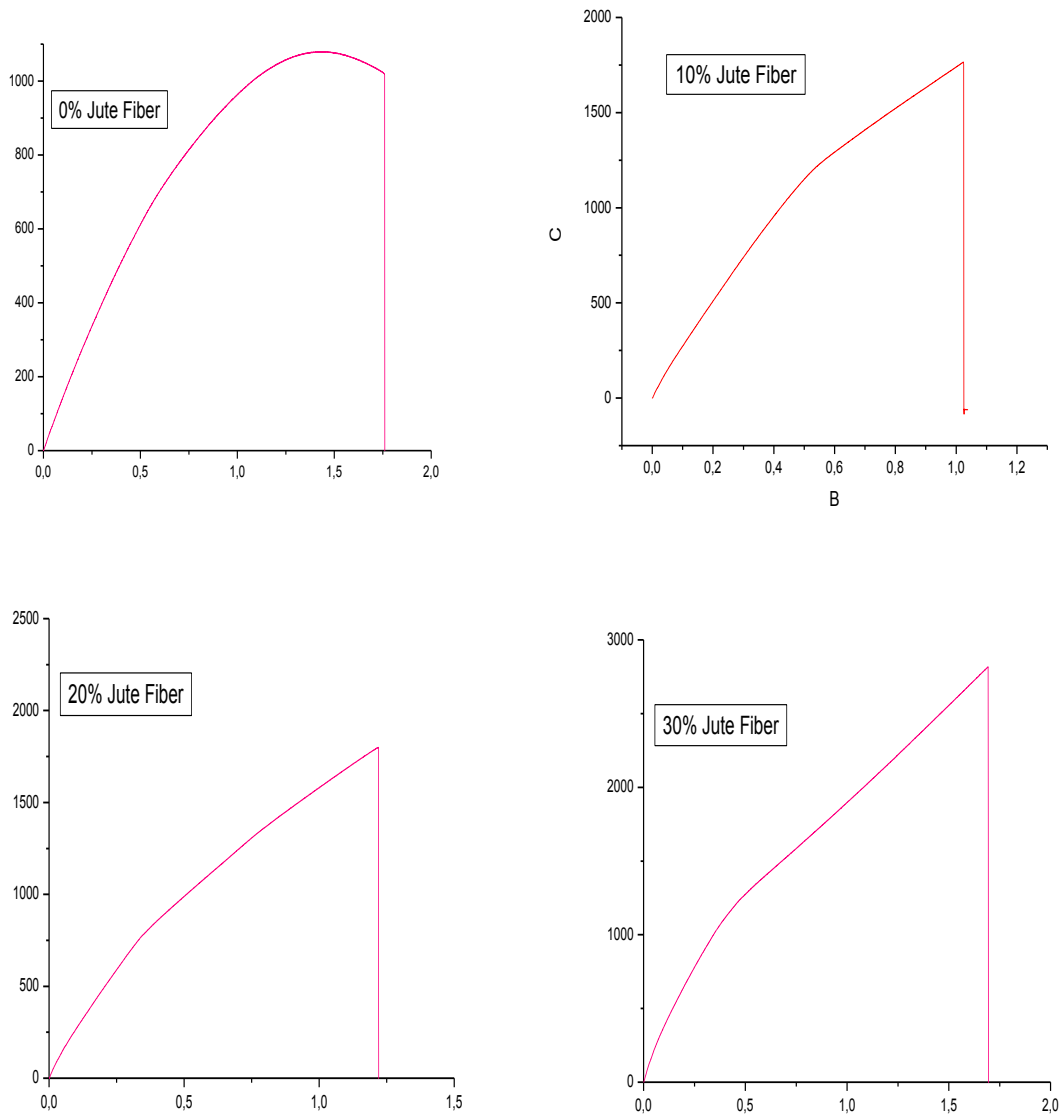


Figura 36 - Tração carga vs As curvas de alongamento para epóxi fração de volume de fibras de juta

A figura 37 ilustra o aspecto típico de corpos de prova de tração rompidos para cada fração de volume de fibras de juta incorporados em resina epóxi.

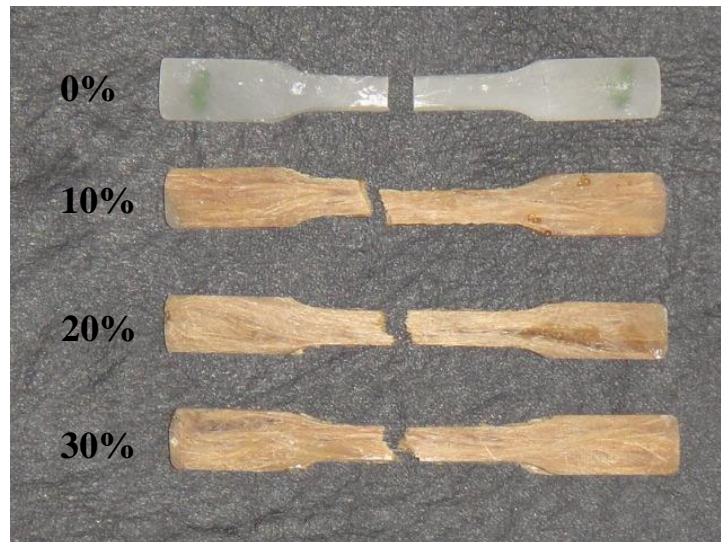


Figura 37 - Espécimes de tração rompidos típicas de compósitos de epóxi com a fração de volume diferente de contínua e juta fibra alinhada

Com base nos resultados da carga de tração vs curvas de alongamento, tais como: os mostrados na figura 36, o módulo de elasticidade e a tensão total foram avaliados. A tabela 6 apresenta o valor médio dessas propriedades de tração para a fração de volume distinta incorporados em compósito epóxi.

Tabela 6 - Propriedades de tração dos compósitos de epóxi incorporados com fibras contínuas e alinhadas de juta

<i>Volume de fibras de juta (%)</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Deformação total (mm)</i>
0	49.80 ± 8.74	1.18 ± 0.30	0.045 ± 0.013
10	71.81 ± 7.85	1.79 ± 0.20	0.040 ± 0.0052
20	83.31 ± 12.95	1.82 ± 0.20	0.046 ± 0.082
30	74.07 ± 21.14	2.44 ± 0.42	0.031 ± 0.012

A figura 38 apresenta-se a variação de tanto a resistência à tração e módulo de elasticidade, apresentados na tabela 6 para compostos de epóxi, com a fração de volume de fibras de juta.

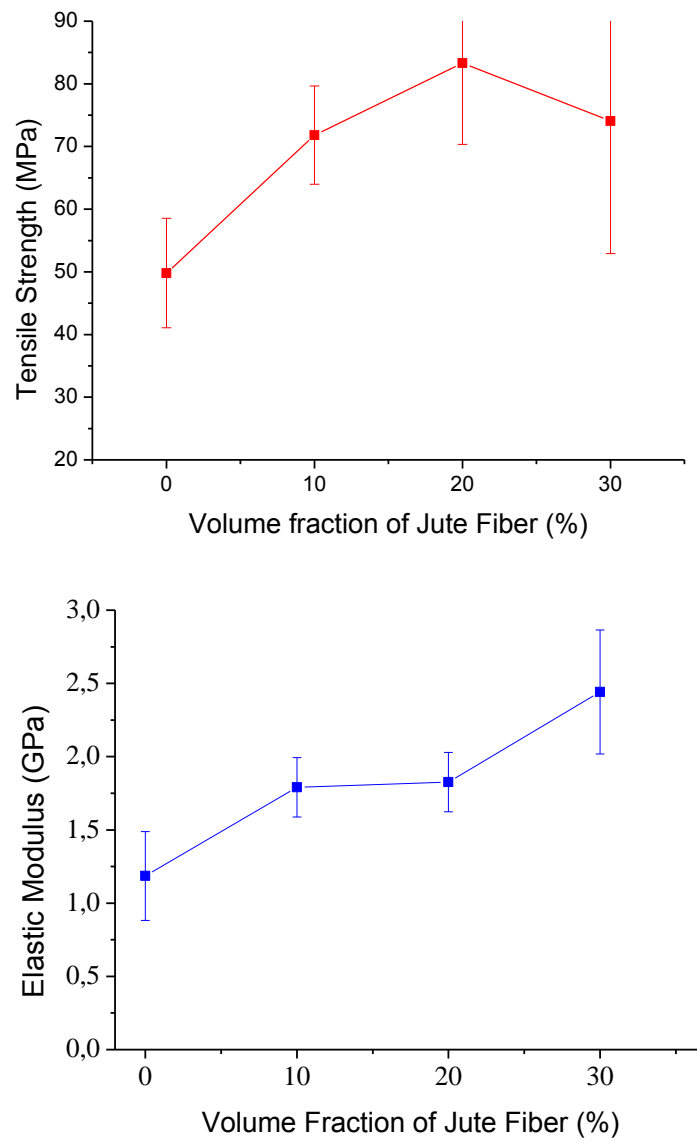


Figura 38 - Variação da resistência à tração (a) e módulo de elasticidade (b) com a fração de volume de fibras de juta em epóxi.

A figura 39 mostra a típica fratura de amostras de tração correspondente a um composto epóxi incorporado com uma fração de volume de 30% de fibras de juta, em vários aumentos no MEV.

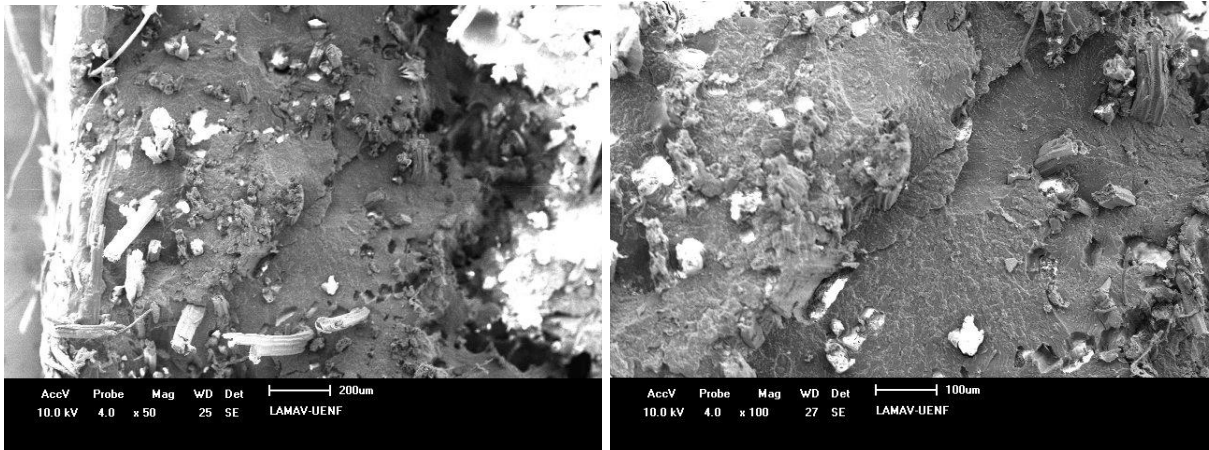
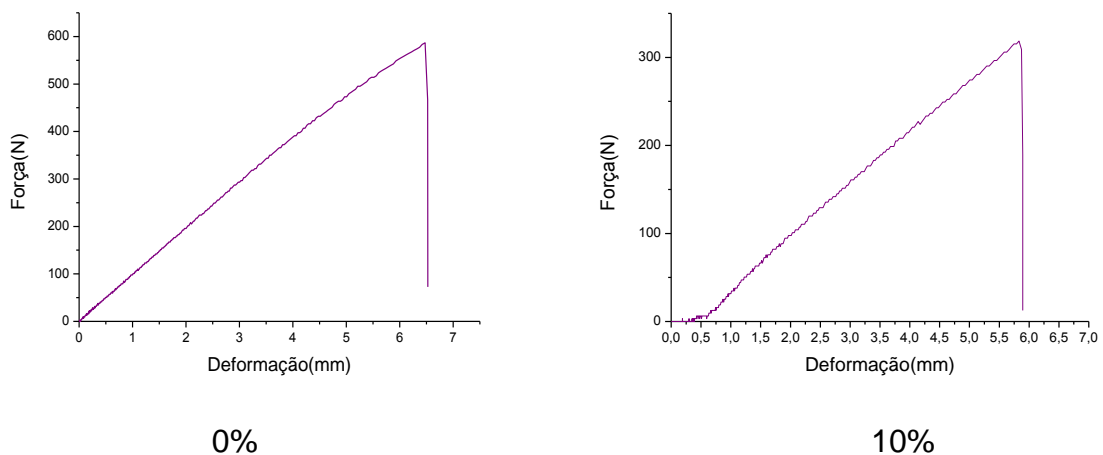


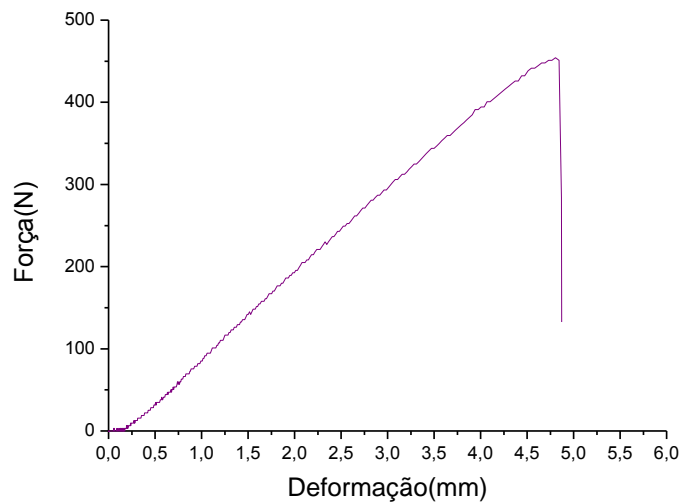
Figura 39 - Micrografias de MEV de um composto epóxi com 30% de fração de volume de fibras de juta: (A) 50x e (b) 100x

5.4 Ensaio de Flexão

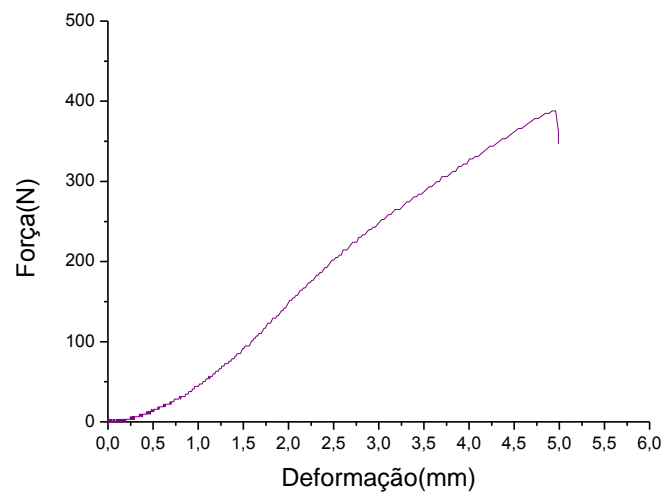
5.4.1 Compósito de Poliéster Reforçado com Fibras de Juta

A figura 40 ilustra o aspecto típico das curvas de força vs. deformação, obtidas nos ensaios de flexão de três pontos, para corpos de prova representativos das diferentes frações de fibras de juta. Nesta figura observa-se que, como esperado, a curva de flexão da resina poliéster pura é linear, correspondendo ao regime elástico até a ruptura, o que caracteriza um comportamento frágil. O mesmo acontece com a maioria das curvas dos compósitos com 10 e 20% de fibras de juta, como exemplificado na figura 40, que também apresentam características frágeis. Isto significa que, ao se atingir o ponto de máxima resistência, a ruptura é súbita com imediata queda de praticamente toda a carga aplicada.





20%



30%

Figura 40 - Curvas de carga vs. deslocamento dos ensaios de flexão de compósitos de matriz poliéster reforçados com diferentes frações de fibras de juta.

Nos compósitos com 30% de fibra, como o exemplo da figura 40, após um início linear, as curvas apresentam um trecho parabólico com suave inclinação característica de uma certa plasticidade. Além disto, ao se atingir o máximo não ocorre uma fratura súbita e a carga oscila no seu lento decréscimo. Isto se deve à efetiva resistência que o maior número de fibras oferece à propagação de trincas através da frágil matriz de poliéster. Ou seja, com 30% de fibra, não existirá mais um percurso fácil através das fibras que permita uma única trinca propagar-se imediatamente por toda a seção do corpo de prova para súbita ruptura, como acontece com os compósitos com 10 e 20% de fibra na figura 40. Em consequência,

a total ruptura dos corpos de prova com 30% de fibra de juta só ocorre após extensa deflexão plástica dos mesmos. Isto está associado a uma elevada tenacidade destes compósitos.

A partir de curvas como as da figura 40, obteve-se o valor das forças máximas, F_m , e as deformações correspondentes, ϵ , e calculou-se, pelas Eq. (11) e (12), a tensão máxima, σ_m , e o módulo de elasticidade, E_m . A tabela 7 apresenta as médias da resistência à flexão e módulo de elasticidade, resultantes de compósitos de poliéster com diferentes frações de volumes de fibra de juta.

$$\sigma_m = \frac{3F_m L}{2bd^2} \quad (11)$$

$$E_m = \frac{L^3 F_m}{4bd^3 \epsilon} \quad (12)$$

Tabela 7 - Resistência à flexão e módulo de elasticidade para compósitos de poliéster reforçados com fibras alinhadas e contínuas de juta.

<i>Volume de fibras de juta (%)</i>	<i>Resistência à flexão (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>
0	62,0 ± 6,0	2,28 ± 0,25
10	53,1 ± 10,7	2,47 ± 0,16
20	34,4 ± 16,3	1,06 ± 0,66
30	10,6 ± 7,3	0,20 ± 0,24

Com base nestes valores, construíram-se os gráficos de variação da resistência à flexão e módulo de elasticidade dos compósitos em função da fração em volume de fibras de juta, como mostrado na figura 41.

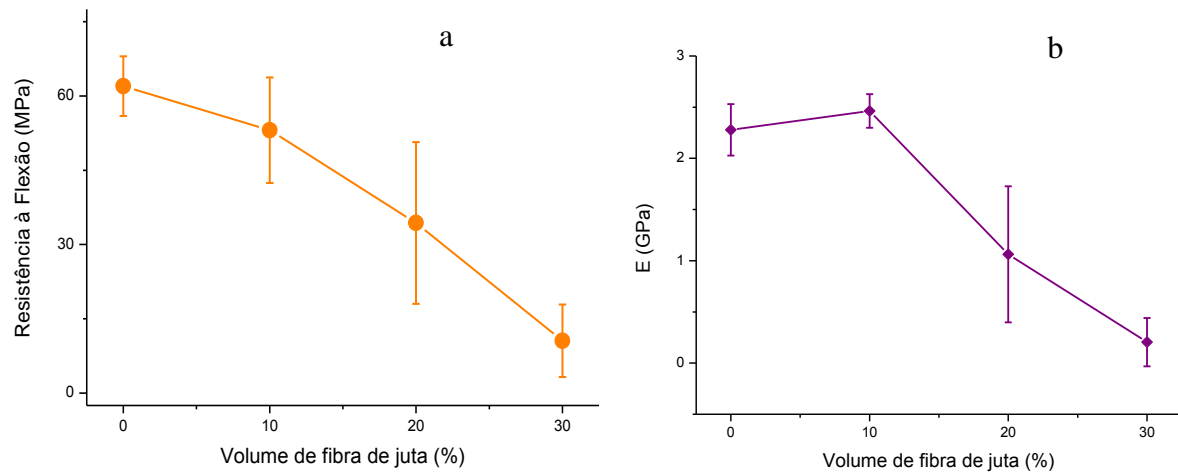


Figura 41 – Variação da resistência à flexão dos compósitos de matriz poliéster com quantidade incorporada de fibras de juta.

No gráfico da figura 41 (a) nota-se um decréscimo na resistência dos compósitos em relação à resistência da resina poliéster pura, 0% de fibra. Com a incorporação de fibras de juta, a matriz poliéster atinge, em média, resistências inferiores a 60 MPa. É importante mencionar que os valores obtidos podem estar relacionados a uma baixa adesão das fibras à resina, o que ocasiona, em princípio, uma dúvida quanto à eficácia do reforço das fibras de juta na matriz poliéster. Isto sugere que uma investigação, com um número de corpos de prova bem maior do que os seis (para cada fração) do presente trabalho, deva ser realizada.

Esta interpretação dos resultados dos ensaios de flexão na figura 41 indicaria que as fibras alinhadas de juta não se constituem em efetivo reforço para compósitos com matriz de poliéster. Isto é, à medida que se incorpora fibra à matriz ocorre um decréscimo marcante na resistência, o que pode ser atribuído aos vazios decorrentes do processamento manual que dificulta a impregnação das fibras pela resina.

O módulo de elasticidade, figura 41 (b), aumenta para o compósito de uma fração de volume de 10% e depois diminui para as demais frações volumétricas. Esse comportamento do módulo de elasticidade ocorre, pois as frações de volume de fibra acima de 20% são difíceis de serem processadas para garantir uma estrutura composta sem poros e falhas (Agarwal e Broutman, 1990).

O comportamento na fratura dos compósitos investigados revelou alguns detalhes importantes. A figura 42 mostra o aspecto visual dos compósitos que foram rompidos em ensaios de flexão. Nesta figura, os principais aspectos a serem observados são a ruptura frágil dos corpos de prova de 0 e 10% de fibra, bem como a aparente não-ruptura das espécies de 20 e 30% de fibra (Ashbee, 1993). Na verdade, até 10% de fibra, a fratura ocorre transversalmente na matriz de poliéster e como as fibras de juta são relativamente poucas não oferecem um obstáculo à propagação de trincas através da matriz. Em contrapartida, para frações volumétricas acima de 20 e 30% de fibra, figura 42, a fratura ocorre principalmente por delaminação entre as fibras e a matriz.

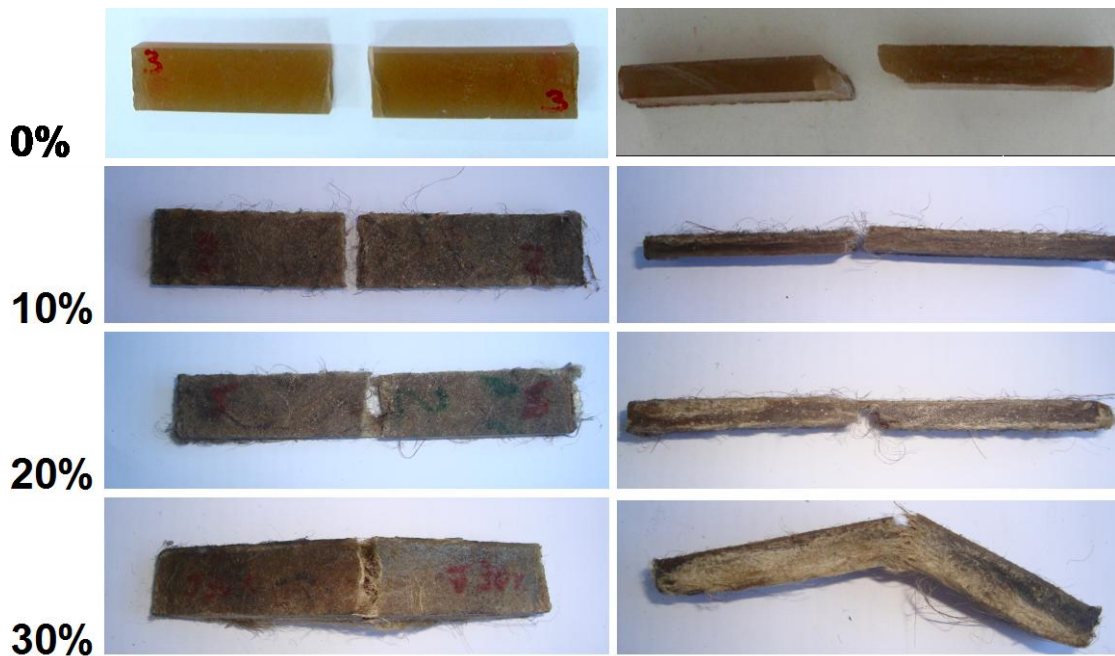


Figura 42 – Aspecto visual dos corpos de prova rompidos: (a) visão frontal; (b) visão lateral.

A figura 43 mostra micrografias típicas da ruptura de compósitos de 30% de juta em matriz poliéster, obtidas em MEV. Nesta figura, pode-se notar, com menor ampliação, figura 43 (a), a matriz de poliéster rompida com fibras incorporadas. Com maior aumento, figura 43 (b), pode-se ver com evidência a descolagem fibra / matriz. Esta parece ser uma consequência da tensão interfacial de cisalhamento relativamente baixa associadas à interação das fibras de juta com uma matriz polimérica.

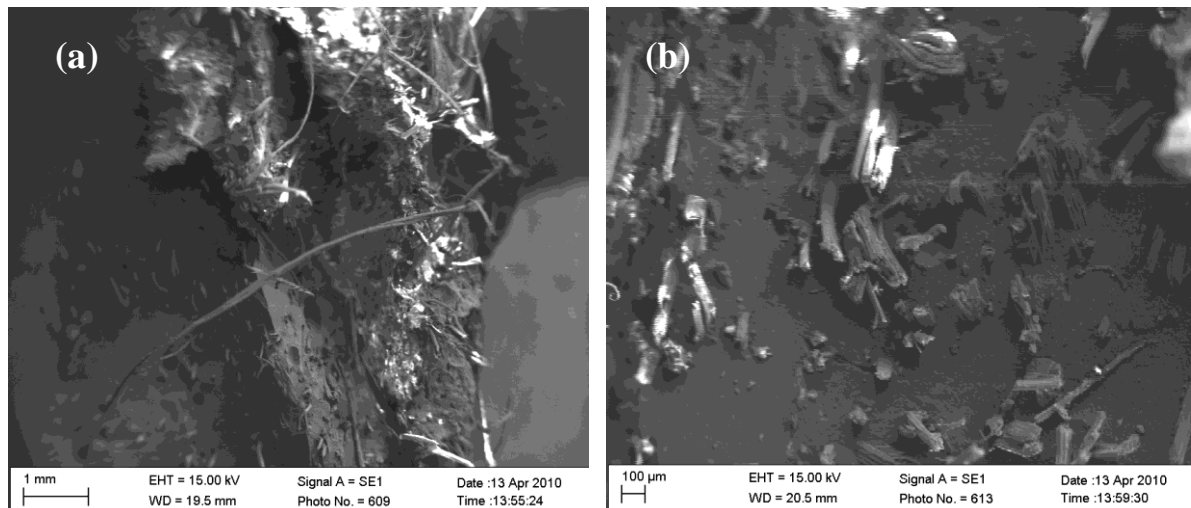


Figura 43 – Micrografia obtida em MEV de compósitos de 30% de fibra de juta reforçados com resina poliéster: (a) 30X e (b) 100X.

5.4.2 Compósito de Epóxi Reforçado com Fibras de Juta

A figura 44 ilustra curvas típicas de carga vs deslocamento. A tensão foi obtida em ensaios de flexão de três pontos para os corpos de prova representativos de diferentes frações de fibras de juta. Esta figura mostra que, como esperado, flexão curva de resina epóxi puro é linear, correspondendo a elástica até a ruptura, que apresenta um comportamento frágil. Da mesma maneira se aplica à maioria das curvas dos compósitos 10, 20 e 30% de fibras de juta, como exemplificado na figura 44. Ao chegar ponto de máxima resistência, a ruptura é súbito com queda de quase imediato em toda a carga.

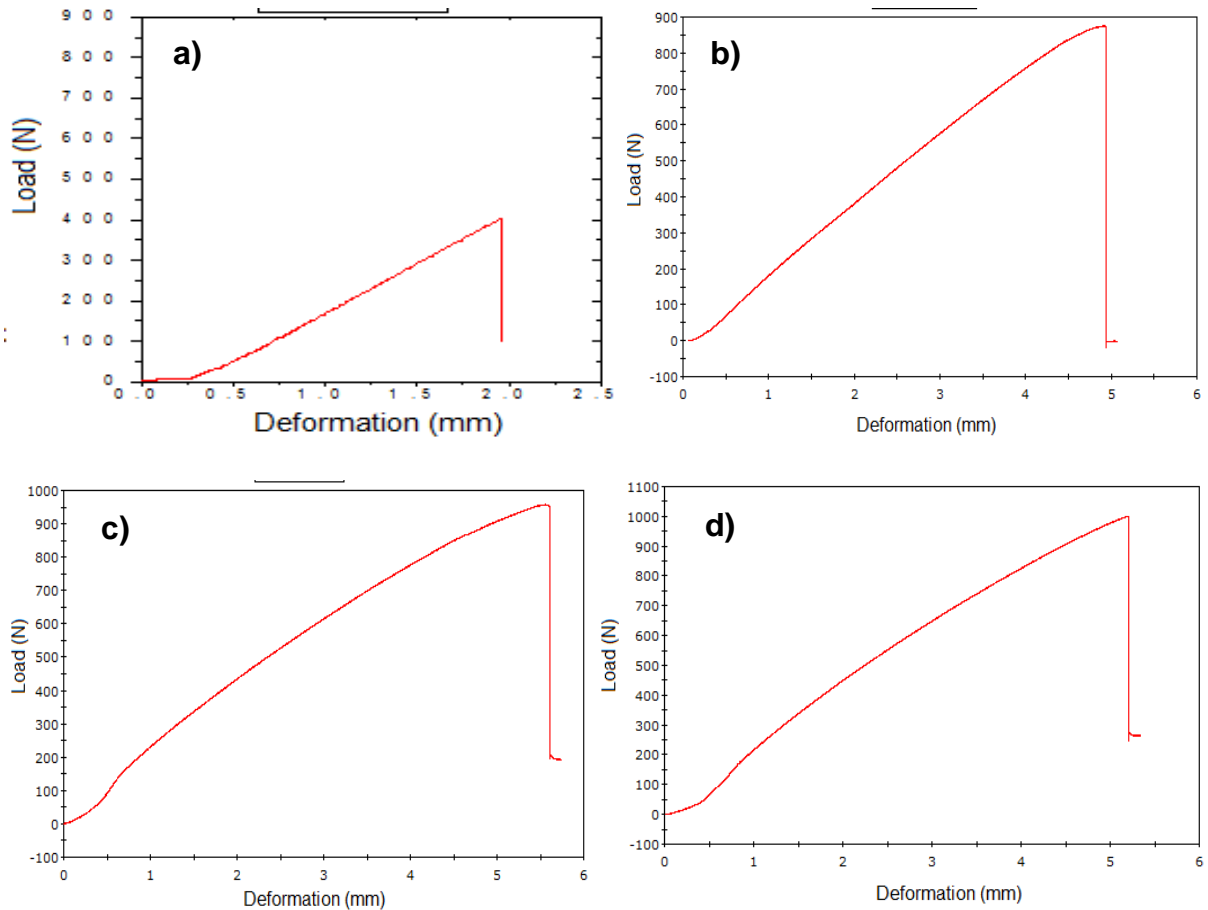


Figura 44 - Carga vs deformação para compósitos juta/epoxi com frações diferentes de fibras: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20% e (d) 30%.

Nos compósitos com 30% de fibra, como o exemplo da figura 44, as curvas mostram uma secção parabólica com suave característico inclinação de uma certa plasticidade. Além disso, quando não atinge máximo ocorre à fratura de carga e oscilações repentinas no seu lento declínio. Isto é devido à resistência eficaz que o maior número de fibras dá a propagação da trinca frágil através da matriz de epóxi. Nomeadamente, com 30% de fibra, haverá um novo caminho fácil através das fibras que permite um único rachadura propagadas imediatamente por toda a secção do espécime a ruptura brusca, como ocorre recipiente contendo compósitos com 10% de fibra e 20% na figura 44. Em consequência, a ruptura completa das amostras com 30% de fibra de juta Ocorre somente após extensa deformação plástica dos mesmos. Isto está associado com uma elevada tenacidade desses compostos.

A partir das curvas da figura 44 foi obtido o valor das forças máximas, F_m , e a estirpe Calculado correspondente e foi mostrado pela equação, a resistência à

flexão. A tabela 8 mostra a composição média de resistência à flexão de epóxi resultante com diferentes frações de volume de fibras de juta.

Tabela 8 - Resistência à flexão e deslocamento de ruptura para os compósitos de fibra de juta.

<i>Volume de fibras de juta (%)</i>	<i>Resistência à flexão (MPa)</i>
0	48.71 ± 4.9
10	55.70 ± 5.2
20	63.65 ± 4.5
30	71.44 ± 5.7

O gráfico da variação de resistência à flexão com as frações de fibras com base na tabela 8 é mostrado na figura 45. Este gráfico indica que à medida que a fração de volume da fibra aumenta, os aumentos de tensão de flexão na sequência de uma relação linear. A interpretação dos resultados do teste de dobragem da fig. 3 indica que as fibras de juta alinhadas constituem um efetivo reforço para os compósitos de matriz de epóxi incorporadas com quantidades de até 30%. Isto é, como a matriz de fibra é incorporado, um aumento na resistência à flexão ocorre. Isto pode ser atribuído a uma maior adesão das fibras para a resina epóxi. De fato, as evidências de uma interação efetiva entre as fibras de juta e a matriz de resina epóxi pode ser observado na fratura composta.

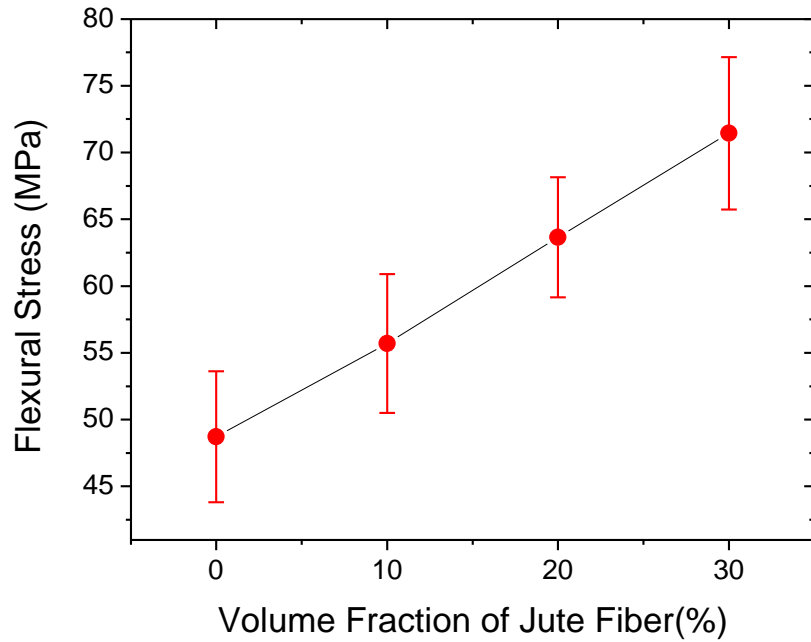


Figura 45 - Variação da tensão de flexão vs fração de fibras de juta.

A figura 46 mostra micrografias de fratura típica de compósitos de 30% da matriz de epóxi juta, obtidas por MEV.

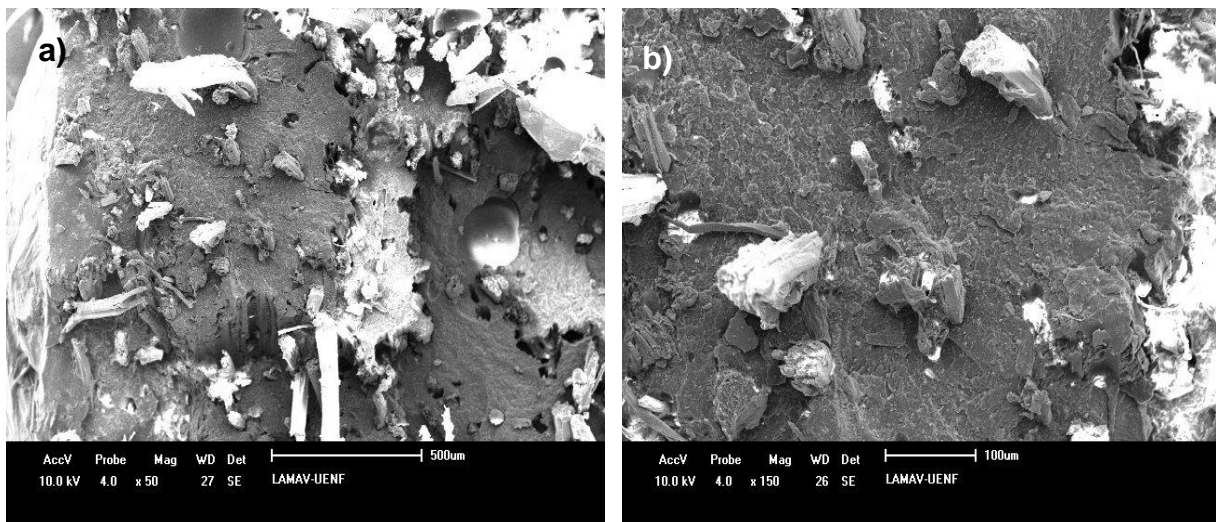


Figura 46 - Micrografia de compósito obtido em 30% de fibras de juta reforçado resina epóxi (a) e 50X (b) 150X.

Nesta figura, pode observar-se, com uma ampliação menor (figura 46), a matriz de epóxi quebrado com fibras embebidas. Com maior Aumento (Figura 46 -b), que pode ser visto com fibra de decolagem evidência/matriz. Esta parece ser uma

consequência da tensão de cisalhamento interfacial ainda associada com relativamente pouca interação fibras de juta com uma matriz de polímero.

5.5 Ensaio de impacto

5.5.1 Charpy compósitos de juta em matriz poliéster

A tabela 9 mostra os resultados dos testes de impacto Charpy dos compósitos de matriz poliéster reforçados com diferentes frações em peso de fibras alinhadas e contínuas de juta.

Tabela 9 - Energia de impacto Charpy para compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta.

<i>Volume de fibras de juta (%)</i>	<i>Energia de impacto Charpy (J/m)</i>
0	24,17 ± 1,77
10	76,44 ± 25,46
20	107,22 ± 20,33
30	346,25 ± 160,25

Baseado nos resultados mostrados na tabela 9, a variação da energia de impacto Charpy com a quantidade de fibra de juta no compósito de poliéster é mostrado na figura 47.

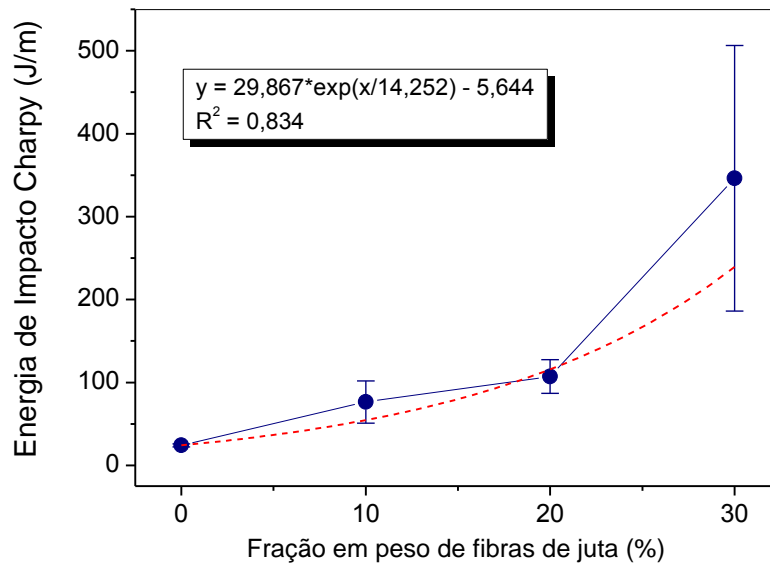


Figura 47 - Energia de impacto Charpy em função das diferentes frações em peso de fibra de juta.

No gráfico nota-se que a incorporação da fibra de juta na matriz de poliéster melhora significativamente a resistência ao impacto do compósito. Dentro do desvio padrão, a melhoria pode ser considerada como uma função exponencial em relação à quantidade de fibra até 20%. O ajuste matemático desta função exponencial está também apresentado em equação na figura 47, juntamente com seu tracejado. A dispersão de valores relativamente elevados, como observado no compósito de 30%, dado pelo desvio padrão associado com os pontos de maior porcentagem de fibras na figura 47, é uma característica bem conhecida das fibras lignocelulósicas (Mohanty *et al*, 2000).

A figura 48 apresenta o aspecto macroscópico dos corpos de prova, com diferentes frações em peso de juta, após terem sido rompidos por impacto Charpy.



Figura 48 - Aspecto dos corpos de prova rompidos por impacto Charpy.

Observa-se que até 20% os corpos de prova foram totalmente separados após o impacto. As pontas de fibra de juta que se destacam para os compósitos de 20 e 30% evidenciam o papel de reforço destas fibras no impacto. Como nem todos os corpos de prova de 30% romperam após o impacto com o martelo Charpy de 11J, estes resultados não podem ser comparados com os resultados dos corpos de prova que são totalmente rompidos em duas partes após o impacto.

Verifica-se também na figura 48 que em todas as amostras a ruptura ocorre no entalhe e que a incorporação das fibras alinhadas de juta resulta em uma mudança acentuada em relação ao poliéster puro, sendo que com 10% de fibras, a ruptura não é completamente transversal. Isso indica que as trincas iniciadas no entalhe se propagam transversalmente através da matriz de poliéster, e quando a trinca atinge uma fibra, a ruptura irá prosseguir através da interface.

A análise das micrografias da fratura de impacto Charpy permitiu ter uma melhor compreensão do mecanismo responsável pela dureza de compósitos de poliéster reforçado com fibras contínuas e alinhadas de juta. A figura 49 mostra o aspecto da superfície de fratura de corpo de prova de poliéster puro (0% de fibra) e um corpo de prova com 20% de fibra.

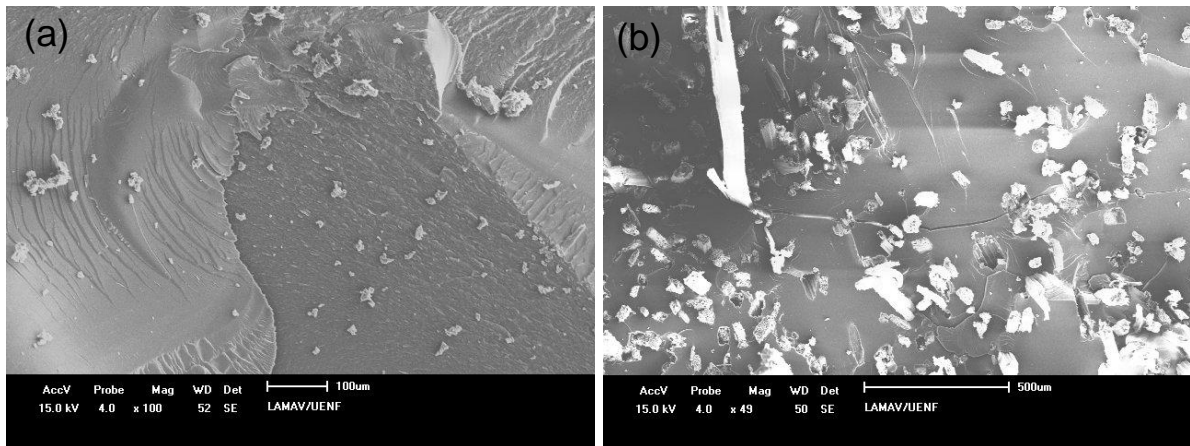


Figura 49 - Superfície de fratura de impacto Charpy da amostra de poliéster puro (a) e compósito de poliéster reforçado com 20% de fibra de juta (b).

A superfície de fratura uniforme, figura 49 (a), indica que a ruptura é causada pela propagação de uma única rachadura, sendo observada a propagação da trinca típica, conhecida como “marcas de rio”, na superfície lisa e frágil. A figura 49 (b) apresenta detalhes da superfície de fratura de um compósito de poliéster com 20% de fibra de juta. Observa-se que algumas fibras foram separadas da matriz e outras foram quebradas durante o impacto, e as trincas se propagam na interface fibra/matriz. As fibras contínuas e alinhadas de juta agem como reforço para o compósito, justificando o aumento da energia absorvida a medida que se aumenta a quantidade de fibras de juta (Crocker, 2008).

5.5.2 Charpy compósitos de juta em matriz epóxi

Os resultados dos testes de impacto Charpy de compósitos com matriz de epóxi reforçado com fibras de diferentes frações de volume de juta são mostrados na tabela 10.

Tabela 10 - Energia de impacto Charpy para compósitos de epóxi reforçados com fibras de juta.

<i>Volume de fibras de juta (%)</i>	<i>Energia de impacto Charpy (J/m)</i>
0	43,89 ± 4,53
10	81,50 ± 23,34
20	151,00 ± 47,25
30	196,50 ± 59,35

Com base nos resultados apresentados na tabela 10, a variação da energia de impacto Charpy com a quantidade de fibras de juta no composto epóxi é mostrado na figura 50.

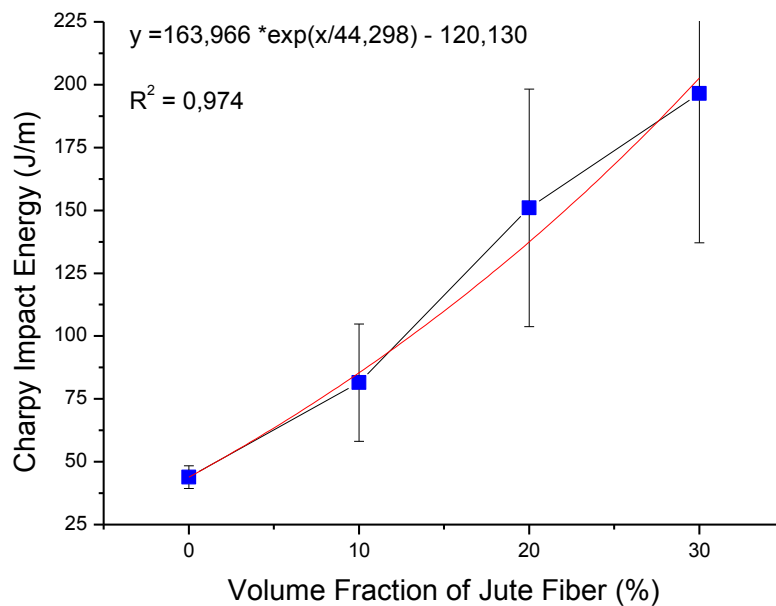


Figura 50 - Energia de impacto de Charpy em função da fração de fibras de juta.

Esta figura mostra a marcada também aumentar em energia de impacto Charpy com a fração de volume de fibras de juta. É importante notar que também pontos relativos a compósitos têm as barras de erro, em relação ao desvio padrão, relativamente grande. Isto é devido à natureza heterogênea das fibras naturais, os resultados nos negócios substanciais que da dispersão das propriedades de compósitos reforçados por eles.

Mesmo considerando as falhas, é possível interpretar o aumento da energia de impacto, ou seja, a dureza do compósito do para variar exponencialmente com a fracção de volume de fibras de juta. A linha que passa através da mediana Demonstra este crescimento exponencial.

Outro aspecto importante a ser tratado é a ruptura macroscópica característica das amostras após o teste. A figura 51 ilustra uma característica típica de ruptura das amostras de compósitos de epóxi com fracções de volume diferentes de fibras de juta. Nesta figura mostra-se que o corpo de prova com 30% de fibras de juta, por sua alta tenacidade, não foi separada em duas partes após o impacto.

Isso indica a nucleação da fenda pelo entalhe, que se espalha em toda a matriz de epóxi frágil. Até 20% de fibras de juta passa a quebrar a matriz para completar ruptura. No entanto, com 30% de juta, o a trajetória da fenda é bloqueado pelas fibras e ruptura torna-se Ocorre ao longo da interface fibra / matriz. O corpo de prova, então se inclina em torno da cabeça do martelo, mas não separa devido à flexibilidade das fibras que não são quebradas. Porque não ocorre ruptura completa, a figura 51 para a amostra com 30% de fibra de subestima a tenacidade do compósito. Se todos as fibras rompessem, causando a divisão do corpo de prova em duas partes, a energia absorvida seria ainda maior.

A razão para ter uma rachadura nucleada pelo entalhe, mudando sua trajetória para alcançar as fibras de juta e de propagar através da interface com a matriz é devido à baixa resistência interfacial.

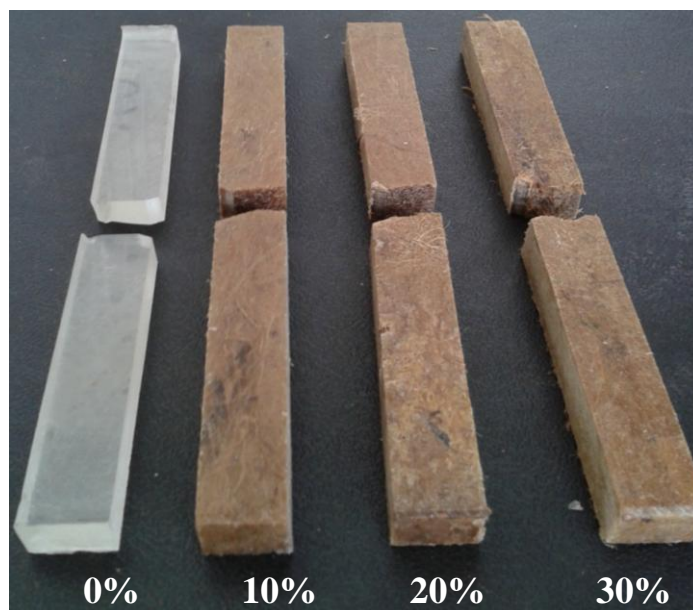


Figura 51 - Corpos de provas típicos rompidos por testes de impacto Charpy.

A análise por MEV da fratura de impacto Charpy permite ter uma melhor compreensão do mecanismo responsável pela maior tenacidade de compósitos de epóxi reforçados com fibras de juta contínuas e alinhadas. A figura 52 mostra o aspecto da superfície de fratura de um corpo de prova de epóxi puro (0% de fibras). Com menor ampliação, a camada mais leve no lado esquerdo das obtidas fotomicrografias, figura 52 (a) corresponde ao modelo de primeira qualidade, revelando as marcas de usinagem paralelas. A camada mais lisa e cinzenta no lado direito corresponde ao atravessar a superfície de fratura. A fratura mostrada na figura 52 sugere que uma única rachadura foi o responsável pela ruptura com a rugosidade na figura 52 (b), estando associada a lacunas e imperfeições que ocorrem durante o processamento.

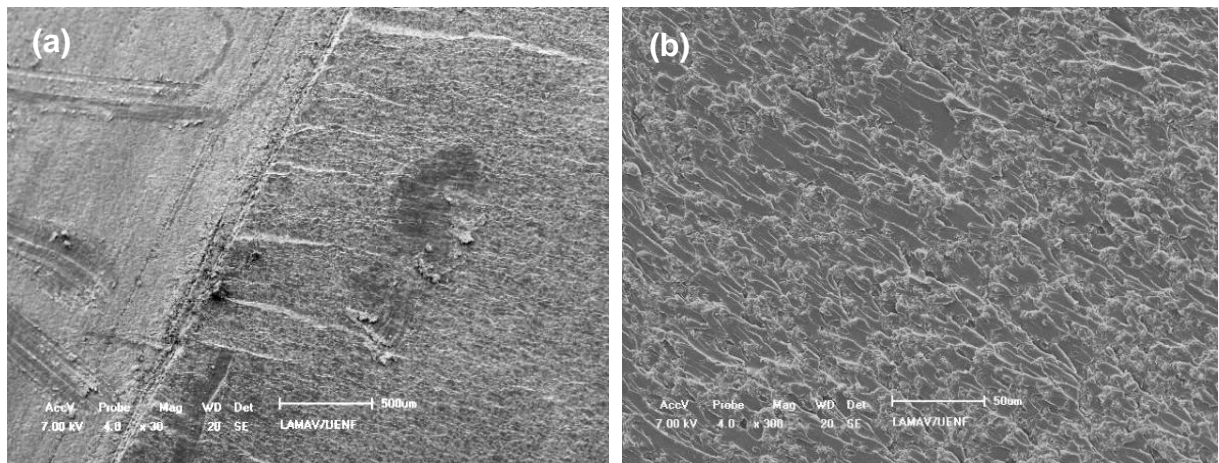


Figura 52 - Superfície da fratura de impacto de Charpy, amostra de epóxi puro (0% de fibra): (a) vista geral; (b) Detalhe da fratura transversal do epóxi.

A figura 53 apresenta os detalhes da superfície de fratura de impacto de um corpo de prova de compósitos com 30% de fibra de juta/epóxi. As micrografias obtidas mostram uma adesão eficaz entre as fibras e a matriz de epóxi, onde rachaduras propagam preferencialmente na interface. Durante o impacto algumas das fibras foram sacadas a partir da matriz e outras foram quebradas. Por outro lado, a parte da amostra em que a ruptura ocorreu preferencialmente longitudinalmente através da interface fibra/matriz revelam que a maior parte da área da fratura está associada com a superfície da fibra. Este comportamento reafirma o mecanismo de ruptura que fissuras propagadas preferencialmente entre a superfície da fibra de juta e a matriz de resina epóxi, devido à baixa tensão interfacial. A área

de fratura mais associada com as fibras de juta alinhadas agindo como reforço para o compósito, justificar a maior energia de impacto absorvido, a figura 50, com aumento crescente quantidade de fibras de juta.

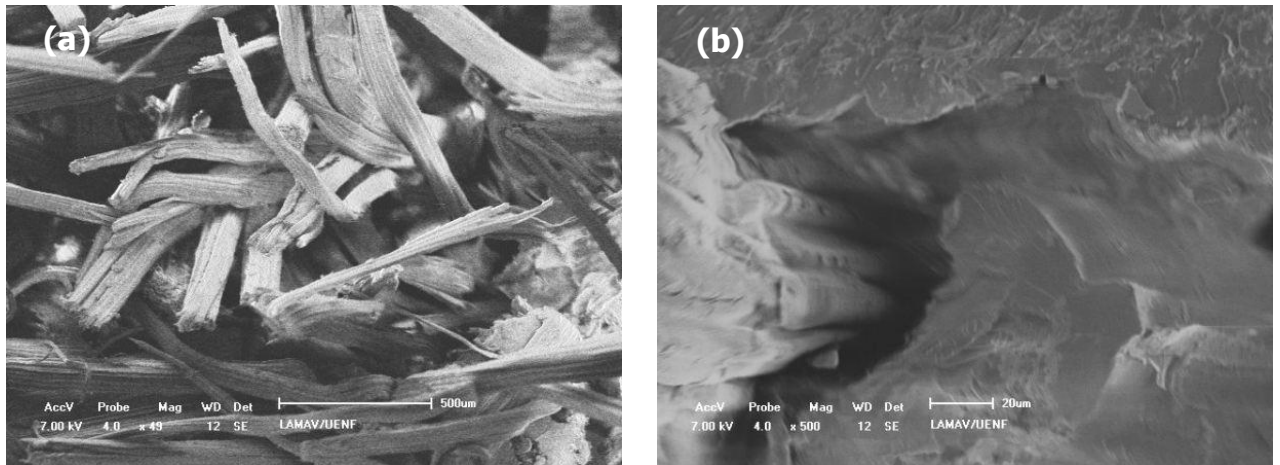


Figura 53 - MEV da superfície de fratura de um corpo de prova de epóxi reforçado com 30% de fibras de juta. (a) 50 X e (b) 500 X

5.5.3 Izod compósitos de em matriz poliéster

Os resultados obtidos nos testes de impacto Izod de compósitos de poliéster reforçado com fibras de juta alinhadas e contínuas, com frações de volume diferentes são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Energia de impacto Izod para compósitos de poliéster reforçado com fibras de juta.

Volume de fibras de juta (%)	Energia de impacto Izod (J/m)
0	7.08 ± 4.50
10	31.07 ± 11.30
20	97.06 ± 25.00
30	133.16 ± 54.06

Com base nos resultados apresentados na tabela 11, a variação da energia de impacto de Izod com a quantidade de fibras de juta no compósito de poliéster é mostrado na figura 54.

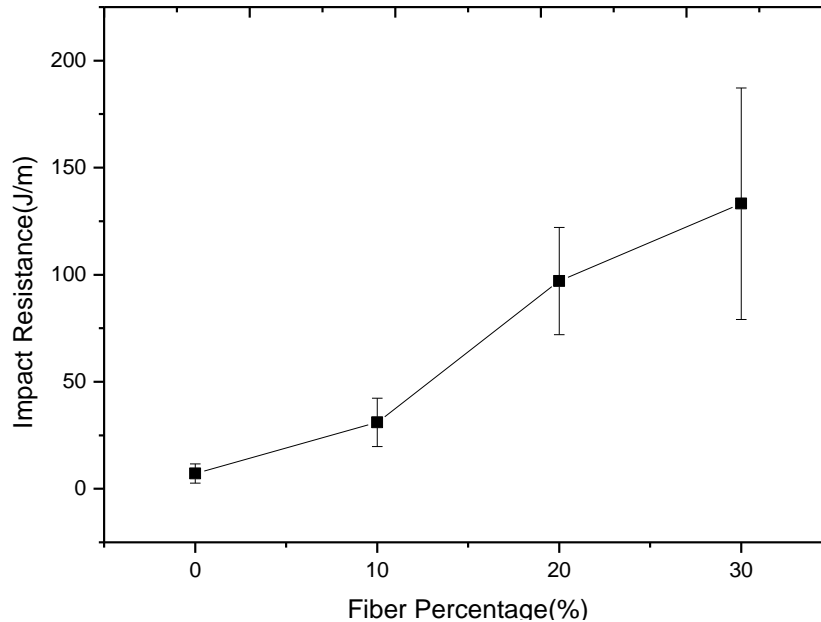


Figura 54 - Energia de impacto de Izod em função da fração de fibras de juta.

Nesta figura note-se que as fibras de juta incorporação na matriz poliéster aumenta a energia de impacto Izod de uma forma exponencial com a fração de volume de fibras de juta. É importante notar que também pontos relativos à compósitos têm as barras de erro, em relação ao desvio padrão, relativamente grande. A relativamente elevada dispersão de valores, dado pelo desvio padrão associado à maior pontos percentuais de fibra na figura 54, é uma característica heterogênea bem conhecido das fibras lignocelulósicas (Mohanty et al, 2001).

A resistência da interface entre relativamente baixo hidrofílica natural e uma matriz de fibra de polímero hidrofóbico contribui para uma transferência de carga ineficaz a partir da matriz de uma fibra mais longa. Isto resulta em relativamente maior e maior energia de superfície de fratura impacto necessário para a ruptura. Os aspectos macroscópicos do espécime típico rompidos por testes de impacto Izod são mostrados na figura 55. Nesta figura note-se que a incorporação de fibra de juta resultados alinhados em uma mudança acentuada em matéria de poliéster puro (0% de fibra), em que um ocorre ruptura totalmente transversal (Mohanty et al, 2006).

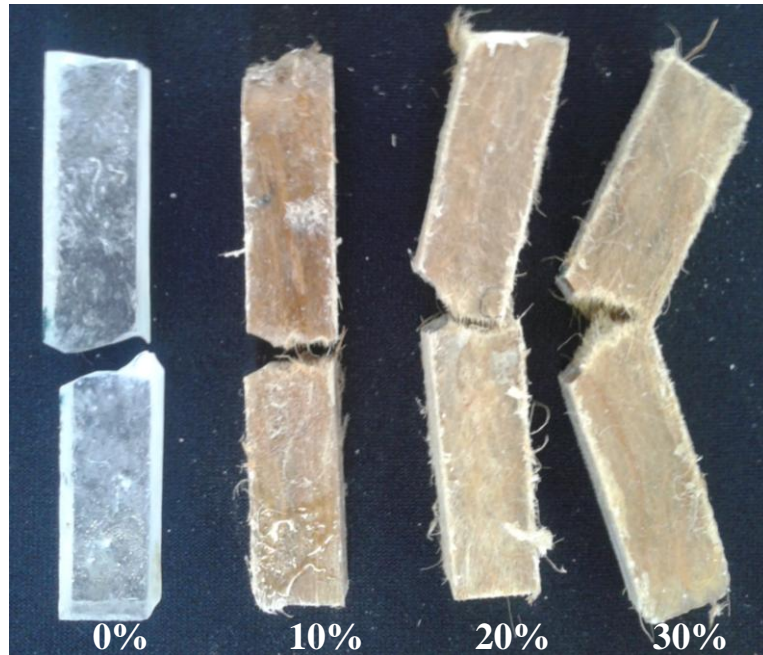


Figura 55 - Típicas fraturas de corpos de provas por testes de impacto Izod.

A análise por MEV da fratura impacto Izod permissão para ter uma melhor compreensão do mecanismo responsável pela maior tenacidade de compósitos de poliéster reforçado com fibras de juta. A figura 56 apresenta os detalhes da superfície de fratura de um impacto de compósitos de poliéster de amostra com 30% de fibras de juta (Bledzki *et al*, 1999). A micrografia mostra uma eficaz adesão obtida entre as fibras e a matriz de poliéster, onde rachaduras propagam preferencialmente. Foram algumas das fibras sacadas a partir da matriz e outros foram quebrados durante o impacto. Por outro lado, a parte da amostra em que a ruptura ocorreu preferencialmente longitudinalmente através da interface fibra/matriz, que implica maior parte da área da fratura está associada com a superfície da fibra.

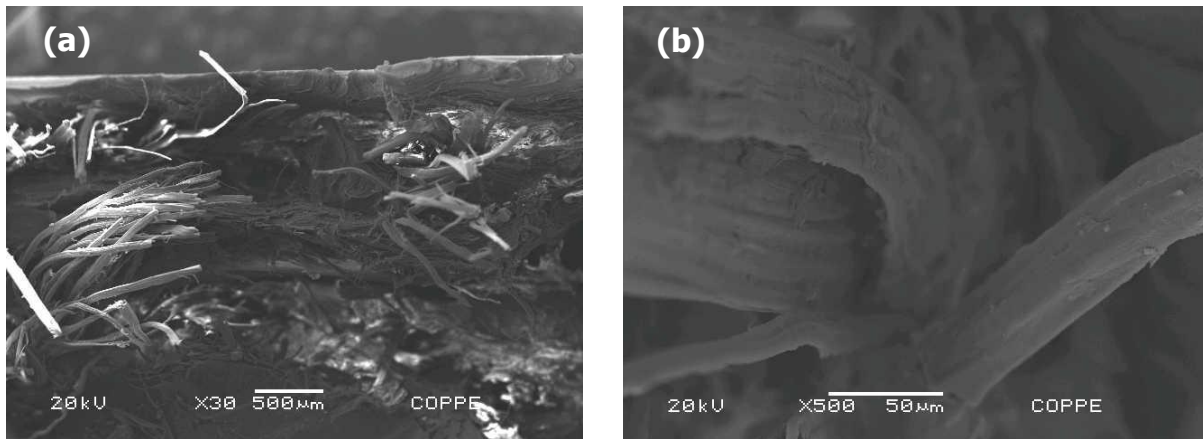


Figura 56 - Impacto superfície de fratura de um composto de poliéster reforçado com 30% de juta: (a) 30 X e (b) 500 X

Este comportamento corrobora com o mecanismo de ruptura que fissuras propagadas preferencialmente entre as fibras de juta e de superfície da matriz de poliéster devido à baixa tensão interfacial. A área de fratura mais, figura 56, o Associado alinhado com fibras de juta que atuam como reforço para o composto, justificar a maior energia de impacto absorvido, a figura 54, com aumento crescente quantidade de fibras de juta.

5.5.4 Izod compósitos de em matriz epóxi

Os resultados obtidos nos testes de impacto Izod de compósitos de epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas de juta com frações de volume diferentes são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Energia de impacto Izod para compósitos de epóxi reforçados com fibras de juta.

<i>Volume de fibras de juta (%)</i>	<i>Energia de impacto Izod (J/m)</i>
0	15,56 ± 5,83
10	26,88 ± 5,94
20	34,50 ± 10,12
30	54,44 ± 17,22

Com base nos resultados apresentados na tabela 12, a variação da energia de impacto de Izod com a quantidade de fibras de juta no composto epóxi é mostrado na figura 57.

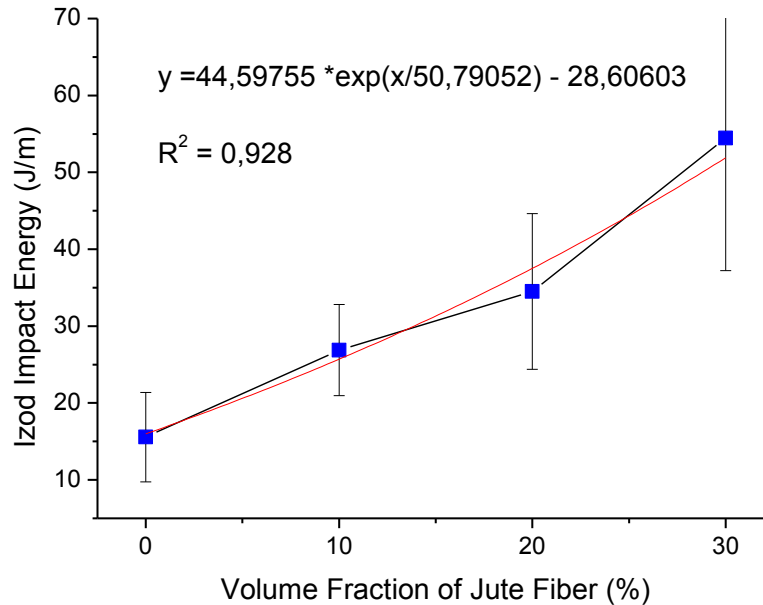


Figura 57 - Energia de impacto de Izod em função da fração de fibras de juta.

A figura mostra que as fibras de juta incorporação na matriz de epóxi no ensaio de Izod eleva a energia do impacto com o aumento da fração de volume de fibras de juta. É importante notar que também pontos relativos à compósitos têm as barras de erro, em relação ao desvio padrão, relativamente grande. A relativamente elevada dispersão de valores, Dado pelo desvio padrão associado à maior pontos percentuais de fibra na figura 57, é uma característica heterogênea bem conhecido das fibras lignocelulósicas.

A resistência da interface entre relativamente baixo hidrofílica natural e uma matriz de fibra de polímero hidrofóbico contribui para uma transferência de carga ineficaz a partir da matriz de uma fibra mais longa. Isto resulta em relativamente maior e maior energia de superfície de fratura impacto necessário para a ruptura. Outro fator é a conformidade à flexão de uma fibra longa Durante o teste de impacto, que foi discutido mais adiante. Os aspectos macroscópicos do espécime típico rompidos por testes de impacto Izod são mostrados na figura 58. Nesta figura note-se que a incorporação de fibra de juta resultados alinhados em uma mudança

acentuada em Matéria de epóxi puro (0% de fibra), em que um ocorre ruptura totalmente transversal.

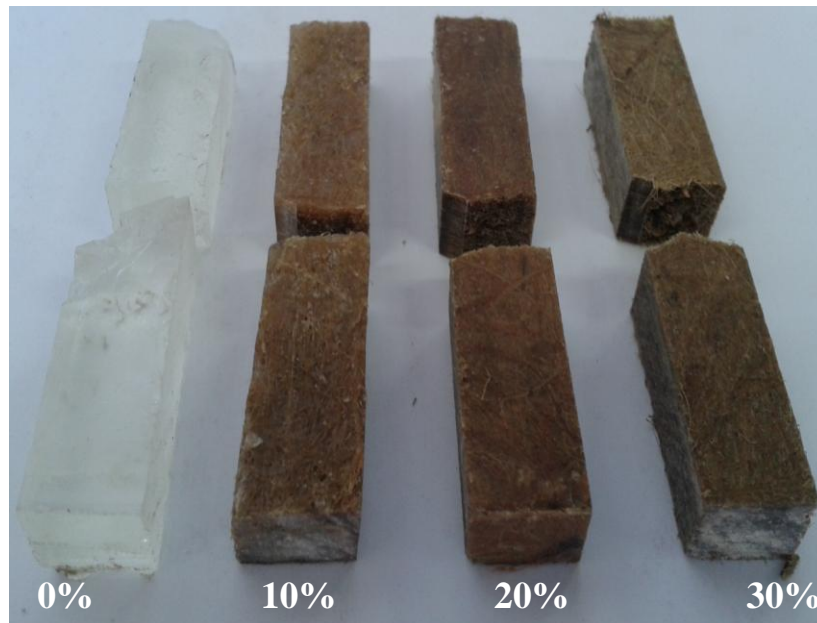


Figura 58 - Corpos de provas rompidos por testes de impacto Izod.

A análise por MEV da fratura impacto Izod permissão para ter uma melhor compreensão do mecanismo responsável pela maior tenacidade de compósitos de epóxi reforçados com fibras de juta. A figura 59 apresenta os detalhes da superfície de fratura de um impacto epóxi espécime compósitos com 30% de fibras de juta. Isso mostra uma adesão obtidas micrografias eficaz entre as fibras e a matriz de epóxi, onde rachaduras propagam preferencialmente. Foram algumas das fibras retirado a partir da matriz e outros foram quebrados durante o impacto. Por outro lado, a parte da amostra em que a ruptura ocorreu preferencialmente longitudinalmente através da interface fibra/matriz revela que a maior parte da área da fratura está associada com a superfície da fibra.

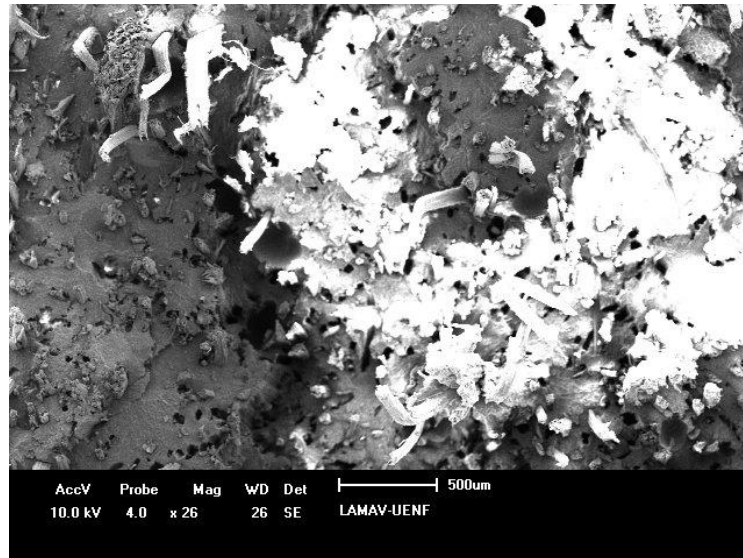


Figura 59 - Impacto superfície de fratura de um compósito epóxi reforçada com 30% de juta 30X

Este comportamento corrobora o mecanismo de ruptura que fissuras propagadas preferencialmente entre fibras de juta e de superfície da matriz de epóxi, devido à baixa tensão interfacial. A área de fratura Mais, figura 59, o Associado alinhado com fibras de juta que atuam como reforço para o compósito, justificar a maior energia de impacto absorvido, a figura 57, com aumento crescente quantidade de fibras de juta.

5.6 Análises Térmicas

5.6.1 TGA/DTG e DSC da Fibra

A estabilidade térmica das fibras de juta é medida por perda de massa por TGA realizada com o aumento da temperatura, apresentado na figura 60. Na figura, pode se notar que depois de uma pequena queda inicial da massa entre 25 e 80°C, esta redução é geralmente atribuída à liberação de água relacionada com a umidade absorvida na superfície de uma estrutura lignocelulósica hidrofílica (Wielage *et al*, 1999).

Após o primeiro passo constante, há uma grande redução de massa, em que a temperatura aproximada ocorre acerca 301,87°C, sob uma atmosfera de O₂. Esta

acentuada diminuição pode estar associada à decomposição da estrutura de fibra de juta, devido à ruptura das cadeias macromoleculares. Com o aumento da temperatura, há uma segunda etapa na curva de TGA, figura 60, ainda um limite de 687°C conjunto para análise. A intercepção da extensão horizontal constante da primeira fase com a linha reta, no ponto de inflexão, correspondente à redução acentuada dá o início da estrutura de decomposição. Como mostrado na figura 60, isto ocorre a temperaturas de início do próximo relativamente de 302°C.

Levando-se em conta a variação da perda de massa com a temperatura nas curvas de TGA, suavizar uma perda de cerca de 9% ocorreram até 200°C. Em seguida, a maior perda de cerca de 69% ocorreram de 200 a 400°C. Depois disso, uma perda contínua cerca de 23% tem lugar a partir de 400 até 687°C, quando menos de 21% da massa aparentemente permaneceu inalterada. Isto é possivelmente devido a cinzas resultantes de reações de oxidação. A dependência da temperatura do DTG, ou seja, a derivada das curvas de TGA forneceu informações adicionais sobre possíveis eventos responsáveis pelos estágios distintos de perda de massa das fibras de juta.

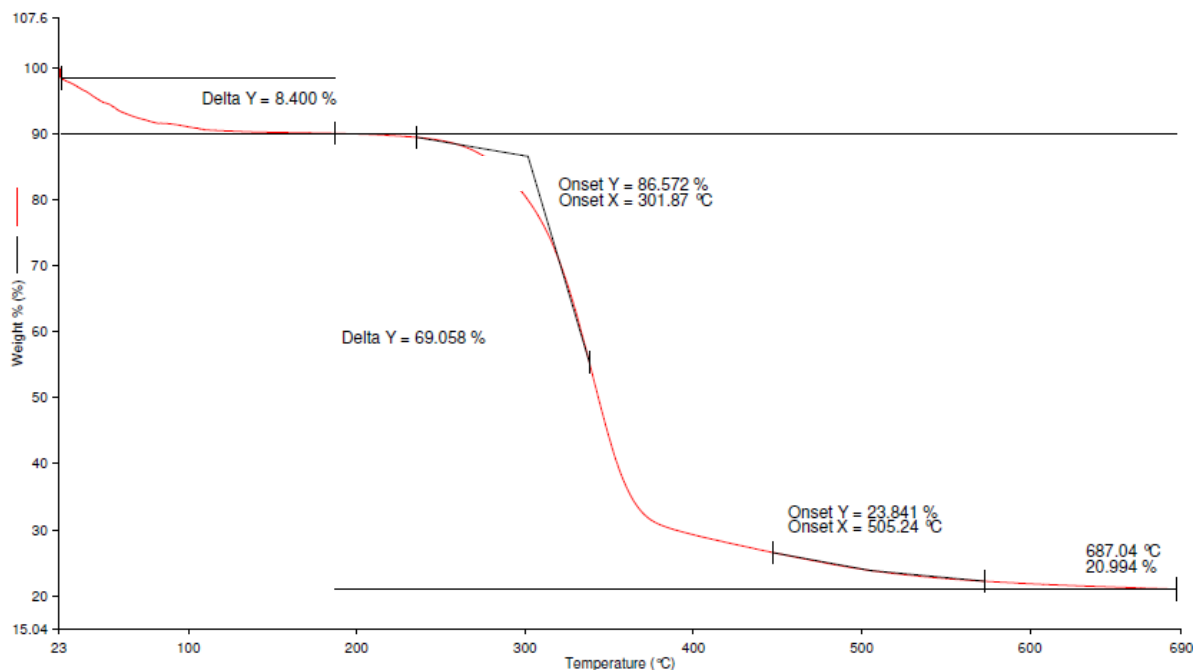


Figura 60 – Curva de TGA para a fibra de juta.

Curva de TGA da figura 60 mostra os níveis importantes de perda de massa associada com eventos para a degradação térmica da fibra de juta. A primeira pequena queda de massa devido à perda de umidade absorvida é relativamente

estreita, 9%. Este resultado, juntamente com as temperaturas de decomposição início perto, a figura 60 indica que a versão inicial da umidade não é afetada pela atmosfera existente. Por outro lado, as diferenças sensíveis na perda de massa durante a estrutura de decomposição, de 69%, juntamente com diferenças correspondentes significativas entre as temperaturas de decomposição, a figura 61 a seguir têm um efeito da atmosfera. Isto foi melhor compreendido em conjunto com as curvas de DTG.

A figura 61 mostra as curvas de DTG para a fibra de juta. De fato, o carbono e o hidrogênio que constituem a estrutura da fibra lignocelulósica de juta devem reagir com o oxigênio de libertação de CO, CO₂ e H₂O. Além disso, outros elementos na estrutura livre, como Ca, K, Na, Fe, etc, com a O₂ também podem reagir para formar óxidos associados com cinzas inertes.

Uma característica da figura 62 é a existência de pequenos picos a 100°C durante O₂ atmosfera. Este é, aparentemente, uma indicação de uma outra perda efetiva de massa que ocorre em temperaturas mais altas do que aquela associada com os primeiros picos. De fato, a existência de dois picos na curva de DTG de fibra natural e do seu compósito de polímero foi relatada como em intervalos de temperatura. O pico de temperatura mais baixa foi atribuída à decomposição dos segmentos moleculares mais rígidos, enquanto o pico de temperatura mais alta estaria relacionada com a decomposição dos segmentos mais resistentes (Mothe *et al*, 2002).

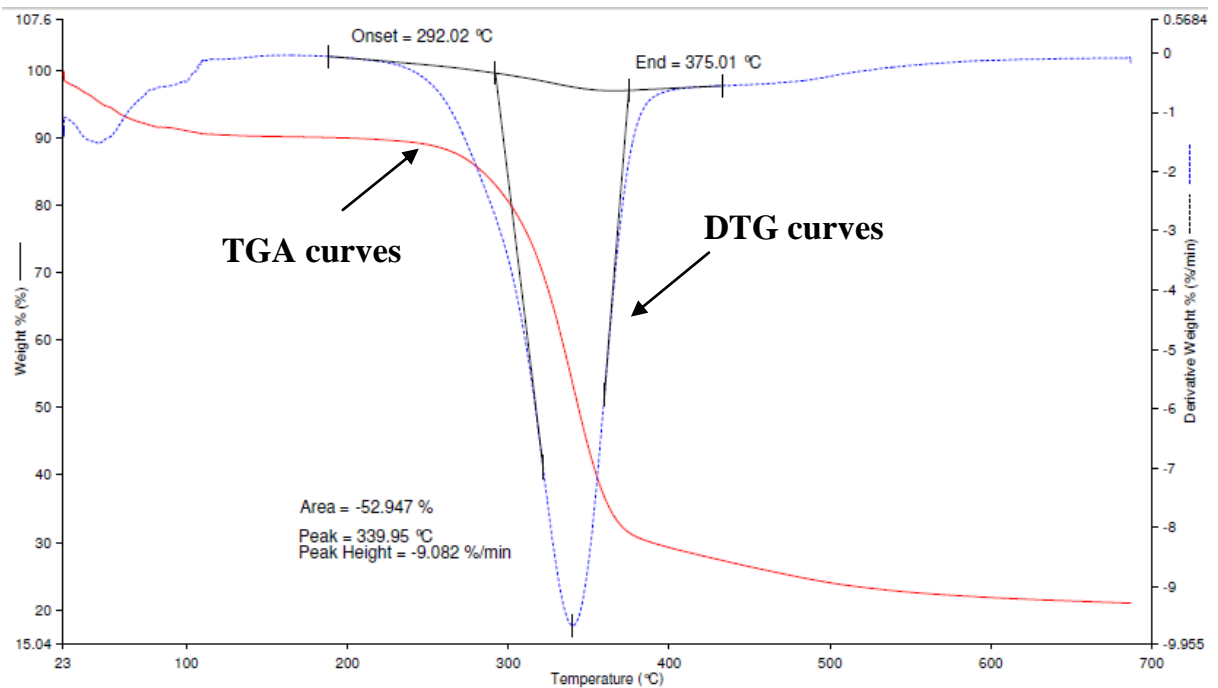


Figure 61 - Curvas TGA e DTG de fibras de juta.

A figura 62 mostra a curva de DSC para a fibra de juta. Nesta figura um evento exotérmico ocorre no intervalo de temperatura de aproximadamente 112°C a 159°C, com um pico a 125°C. O calor exotérmico lançado neste evento foi de 63 J/g. A sua estrutura da cadeia macromolecular decorre no processo de degradação térmica que começa por volta dos 100°C e, sob uma atmosfera de oxidação, que deixa um resíduo sólido de menos do que 10% de sua massa total. Estas características estabelecem limites para as aplicações de engenharia da fibra de juta, especialmente como um material isolante. Aparentemente, os picos encontrados para fibras lignocelulósicas em torno desta temperatura correspondem à ocorrência de perda de água que constituição da estrutura de cellulose.

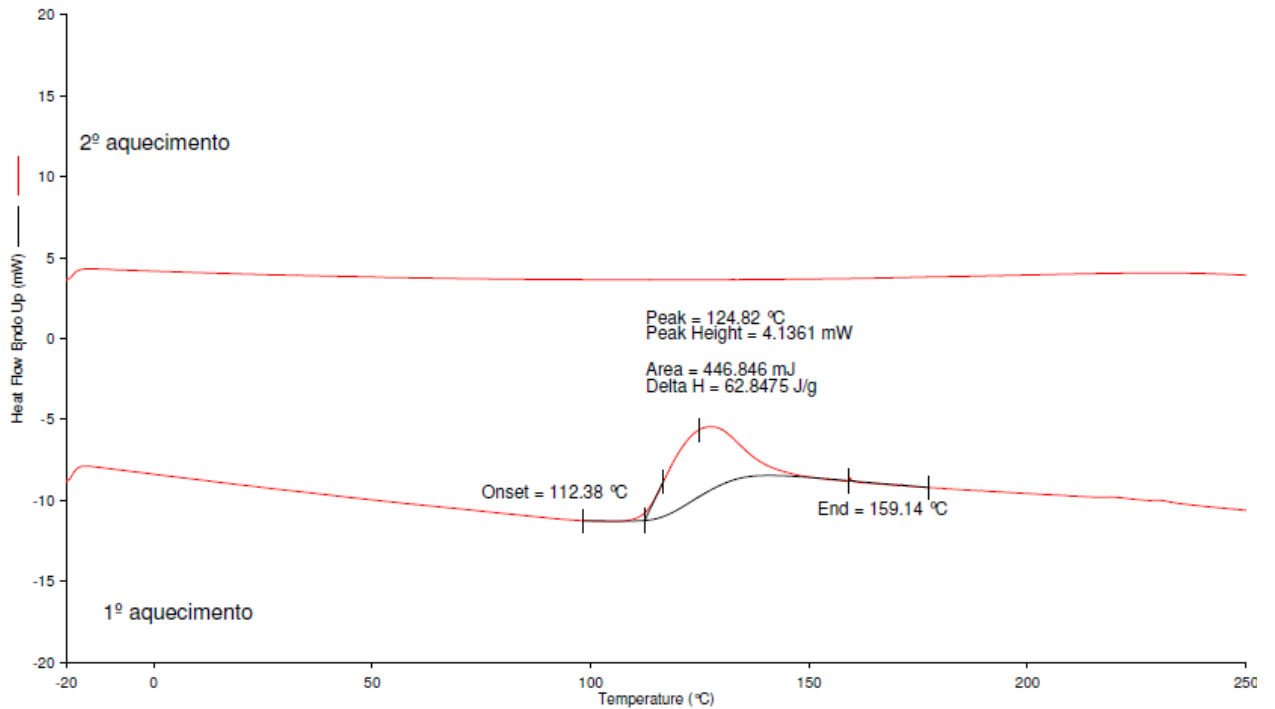


Figura 62 - Curva de DSC para a fibra de juta.

5.6.2 TGA/DTG e DSC de juta em matriz epóxi

A figura 63 mostra as curvas de TG/DTG para o DGEBA/TETA a temperatura ambiente para o epóxi puro obtido após um dia de cura. Nesta figura, é possível ver que a curva TG apresenta uma ligeira diminuição, menos de 1% de perda de massa, na primeira fase até 300°C. Isto é seguido por uma segunda fase de até 550°C acerca em associação com a maior perda de massa, acima de 90% do massa da amostra total.

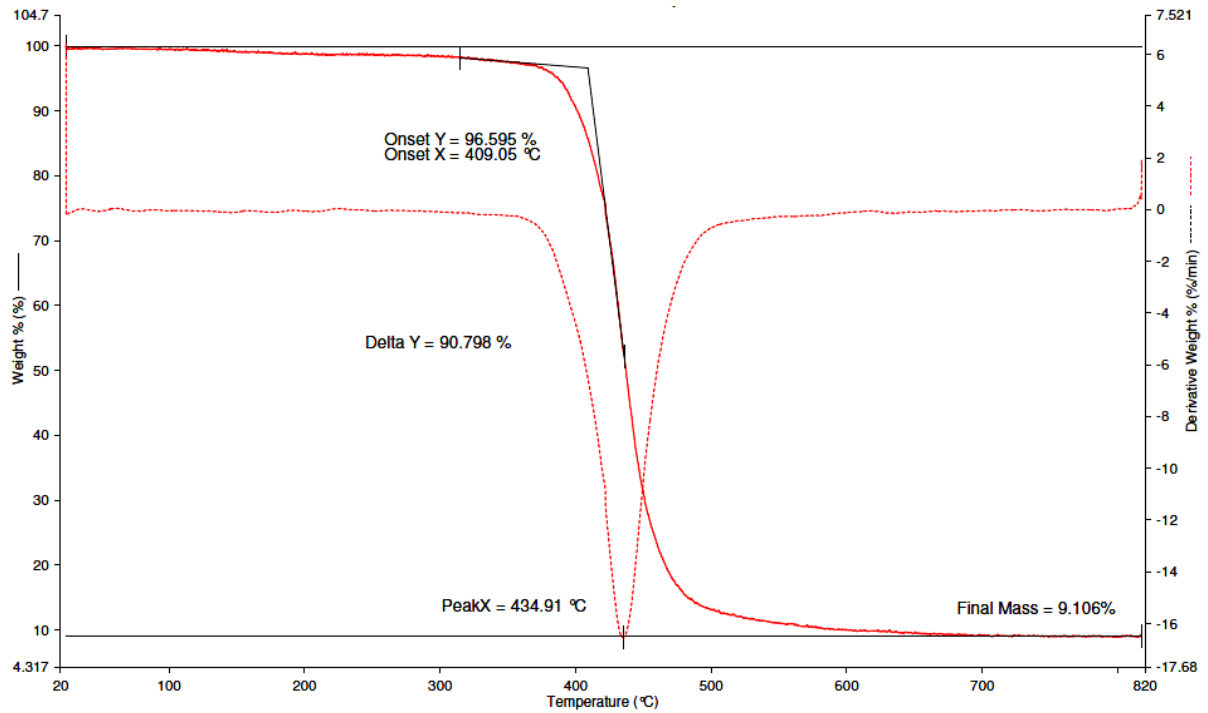


Figura 63 - As curvas TG/DTG da epóxi puro DGEBA/TETA.

A temperaturas ainda mais elevadas, 550-800 ° C, uma terceira etapa, muito lentamente em declínio com a perda de massa correspondente a 9,1% da amostra, é observada na figura 63. A curva DTG mostra apenas um pico simétrico e uniforme relacionada a uma taxa máxima de perda de massa em 435 ° C. Tal pico bem definido é típico de resinas poliméricas puras que também estão associados com uma pequena quantidade de resíduos de temperatura relativamente elevada. Em polímeros puros, este pico único DTG está relacionada com o principal mecanismo de decomposição térmica de macromoléculas cadeia degradação ou despolimerização. Os parâmetros termogravimétricas obtidos das curvas de TG/DTG na Figura 63 são apresentados na tabela 13.

Tabela 13- Parâmetros termogravimétrica da epóxi puro DGEBA/TETA e compósitos com até 30% em volume de fibras de juta.

<i>Volume de fibra</i>	<i>Initial moisture peak (°C)</i>	<i>Onset of the second stage (°C)</i>	<i>Shoulder peak in the second stage (°C)</i>	<i>Main peak in the second stage (°C)</i>	<i>Final residue (%)</i>
Epóxi – 0%	-	409	-	435	9.1
Epóxi – 10%	86	378	434	450	12.2
Epóxi – 20%	83	375	420	458	13.6
Epóxi - 30%	80	381	408	459	14.3

Da figura 64 a 66 são mostradas as curvas de TG/DTG para os DGEBA/TETA compósitos com matriz de epóxi reforçado com 10, 20 e 30% em volume de fibras de juta, respectivamente. Os principais parâmetros obtidos a partir termogravimétricas dessas curvas são apresentados na tabela 13. Os resultados apresentados na figura 64 a 66, em conjunto com os valores da tabela 13 revelam diferenças sensíveis no que toca a resultados correspondentes na figura 63 para o epóxi DGEBA/TETA, que serve como matriz composta. Diferente do que o epóxi puro, o primeiro estágio nos compósitos, até 300°C, apresenta pequenos picos entre 83 e 86°C, em associação com um aumento significativo de perda de massa passou de 2,1 para 2,9% com a quantidade de fibra de juta. Estes picos iniciais em temperaturas mais baixas são características naturais de fibra de compósitos poliméricos reforçados e atribuído à liberação de água adsorvida na superfície de todas as fibras lignocelulósicas. Embora pequena, estes picos iniciais poderia ser considerado como um primeiro limite para a estabilidade térmica de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas, particularmente os de fibra de juta em matriz de epóxi.

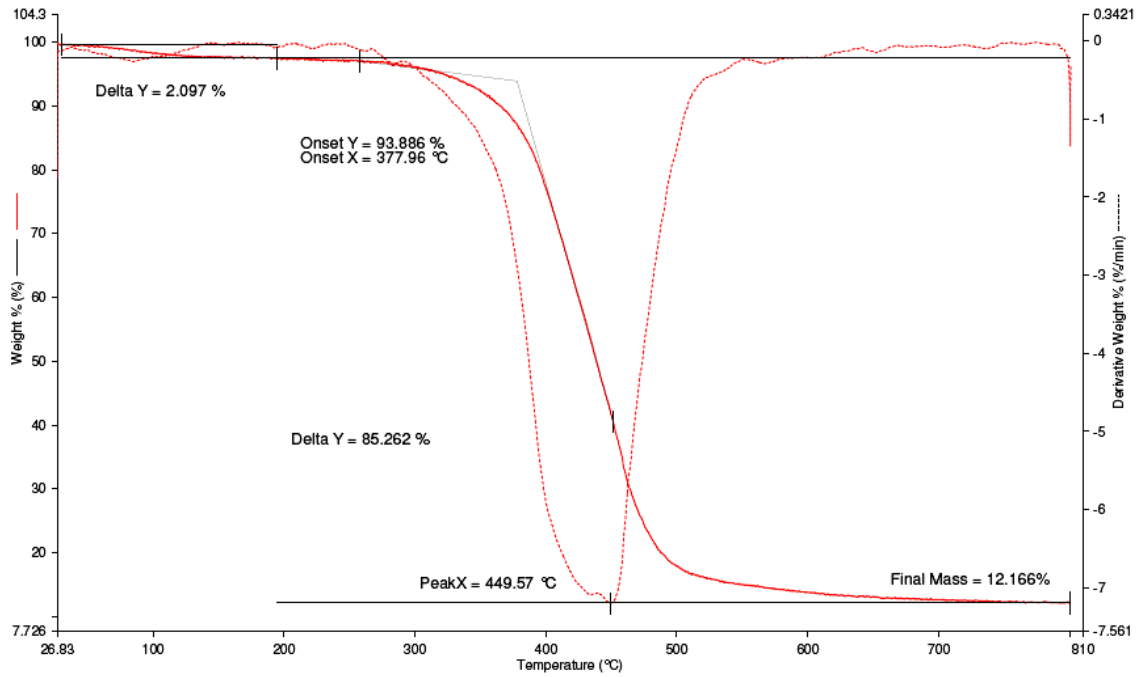


Figura 64 - Curvas TG / DTG de epóxi DGEBA/TETA reforçados com 10% em volume de fibras de juta

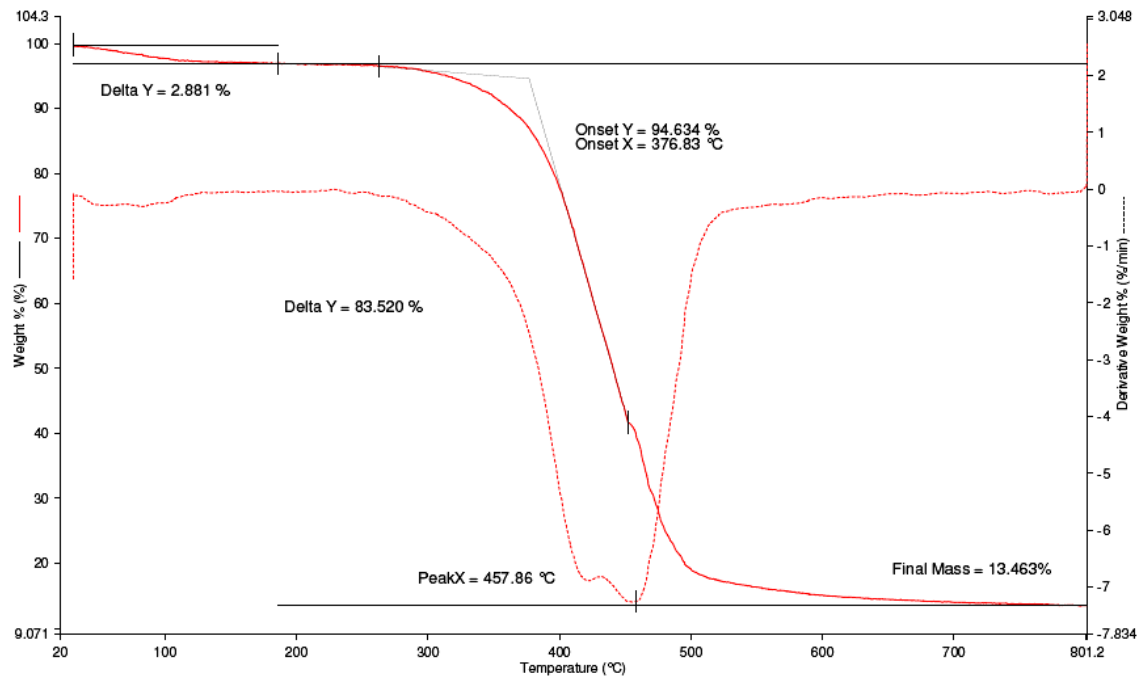


Figura 65 - Curvas TG/DTG de epóxi DGEBA/TETA reforçados com 20% em volume de fibras de juta.

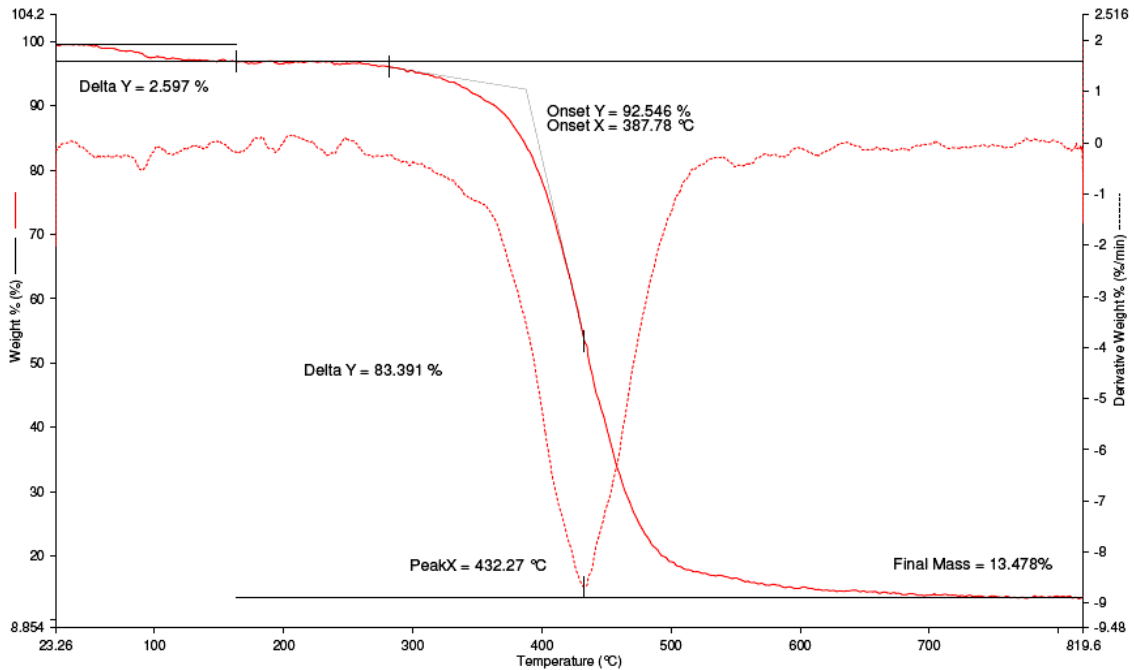


Figura 66 - Curvas TG/DTG de epóxi DGEBA/TETA reforçados com 30% em volume de fibras de juta.

Outra diferença relevante entre o epóxi puro e os compósitos refere-se ao início da segunda etapa TG associado à maior perda de massa, até cerca de 500°C. Conforme apresentado na tabela 13, este aparecimento de epóxi puro ocorre a 409°C, é opaco uma temperatura acima aqueles sensivelmente, 375-381°C, para os compósitos. Comportamento semelhante foi relatado por Mohanty *et al* (2006) para compósitos de matriz de polietileno reforçado com fibras de juta. A razão para esta redução da temperatura de início da segunda fase, que é tecnicamente aceite como o limite de compósito de estabilidade, é atribuída ao processo de decomposição térmica de fibras de juta. Na verdade, como qualquer fibra lignocelulósica, a juta fibra começa a sua decomposição térmica por a lignina, a temperaturas tão baixas como 220°C (Nguyen *et al*, 1981). Em cerca de 300-400°C, esta decomposição é maximizada. Em seguida, é a fibra de juta sugeriu que a degradação da lignina ser o responsável pelo limite de estabilidade térmica composta. Em outras palavras, o limite de fibra de juta estabilidade compósitos de epóxi DGEBA/TETA deve ser dada pela temperatura de início da segunda fase TG, conforme listado na tabela 13.

Em particular, vale a pena mencionar que uma obra de Doan *et al* (2007) em análise térmica de fibras de juta isolados revelou picos de liberação de água inicial de cerca de 30°C. Além disso, no isolado juta fibra início da decomposição térmica

ocorre a 290 °C deve ser devido à degradação da lignina e hemicelulose. Além disso, ainda segundo os autores os principais picos em torno de 350°C que foram atribuídos à degradação da celulose. Estes resultados anteriores mostraram que o isolado juta fibra é menos resistente do que termicamente ambos os compósitos de epóxi DGEBA/TETA e relacionados apresentados na tabela 13.

Outro aspecto importante da termogravimétrica dos compósitos mostrado nas figuras 64 a 66 de vale discutir a existência de picos de ombro nas curvas de DTG. Estes picos de ombro são observados em outros compósitos de fibra de lignocelulósicos (Ferreira *et al*, 2010) e atribuiu à degradação das fibras componentes especialmente as hemiceluloses e celulose (Gañan e Mondragom, 2003). Um pico principal DTG observado é não só para o epóxi puro a 435°C na figura 63, mas também a temperaturas mais elevadas 450-459°C para os materiais compósitos nas figuras 64 a 66. Este principal pico de epóxi associada com a decomposição, aparentemente é afetada pela presença de fibras de juta. Propõe-se que as macromoléculas de fibra de celulose não interajam com as do epóxi e não aumentam a estabilidade térmica do compósito.

Como um último ponto a ser tratado, a introdução de fibras de juta, como apresentado na tabela 13 o aumento da quantidade de resíduo de alta temperatura, de 9,1% em epóxi puro, figura 63, a 12,2-14,3% em compósitos, figuras 64 a 66. Isto pode ser atribuído para a participação de matéria carbonizada e alcatrão/char, predominantemente formado no processo de pirólise da fibra de juta. Isto resulta também em menor perda de massa na segunda fase dos compósitos termogravimétrico.

5.7 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

5.7.1 Compósito de Epóxi Reforçado com Fibras de Juta

Comparando-se os resultados das figuras 67, 68, 69 e 70 vê-se que a incorporação de fibras de juta na matriz epóxi, provoca modificações significativas ao comportamento DMA dos compósitos (Silva *et al*, 2011). Em princípio, o módulo de armazenamento e picos $\tan \delta$ são substancialmente aumentada com um

pequeno deslocamento para temperaturas mais elevadas. Por contraste, o módulo de perda diminuição da amplitude, mas a sua posição é deslocada para temperaturas mais elevadas, com a incorporação de fibras de juta no compósito.

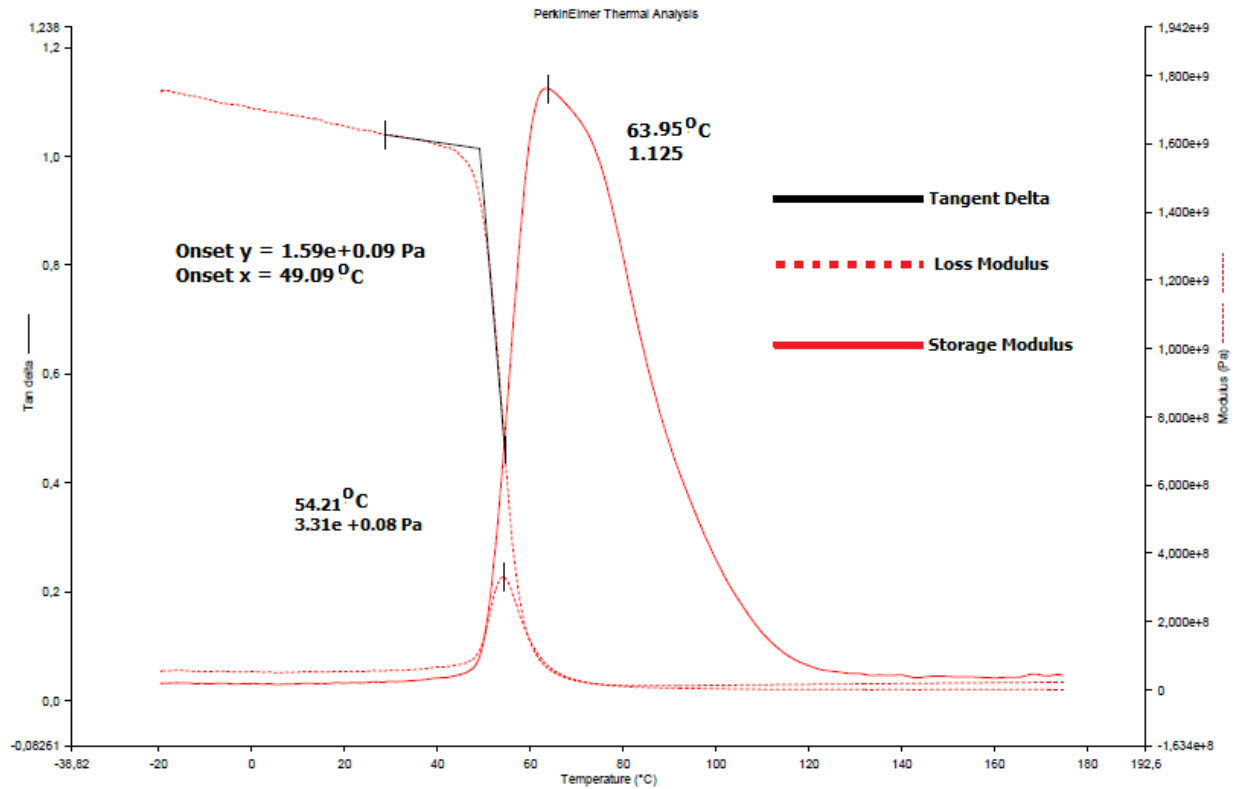


Figura 67 – Curvas de DMA para epóxi puro.

Isso deve-se observar a incorporação de fibras de juta como esperado sensivelmente o aumento do valor de E' . Um aumento efetivo, sendo mais para os 20% de fibra de juta. Na verdade, a 49,09°C, $E' = 1,59$ GPa para o epóxi puro (0% de fibra) levanta a 2,30 GPa para 20% de fibra de juta. A razão pela qual a fibra composta de 30% tem menor E' que o compósito de fibra de 20% pode ser atribuída à imperfeição: tais como poros, devido à dificuldade no processamento de um composto com uma quantidade maior de fibras relativamente dentro de uma matriz polimérica (Okubo *et al*, 2005). Condição semelhante ocorreu para o E'' e curvas $\tan \delta$.

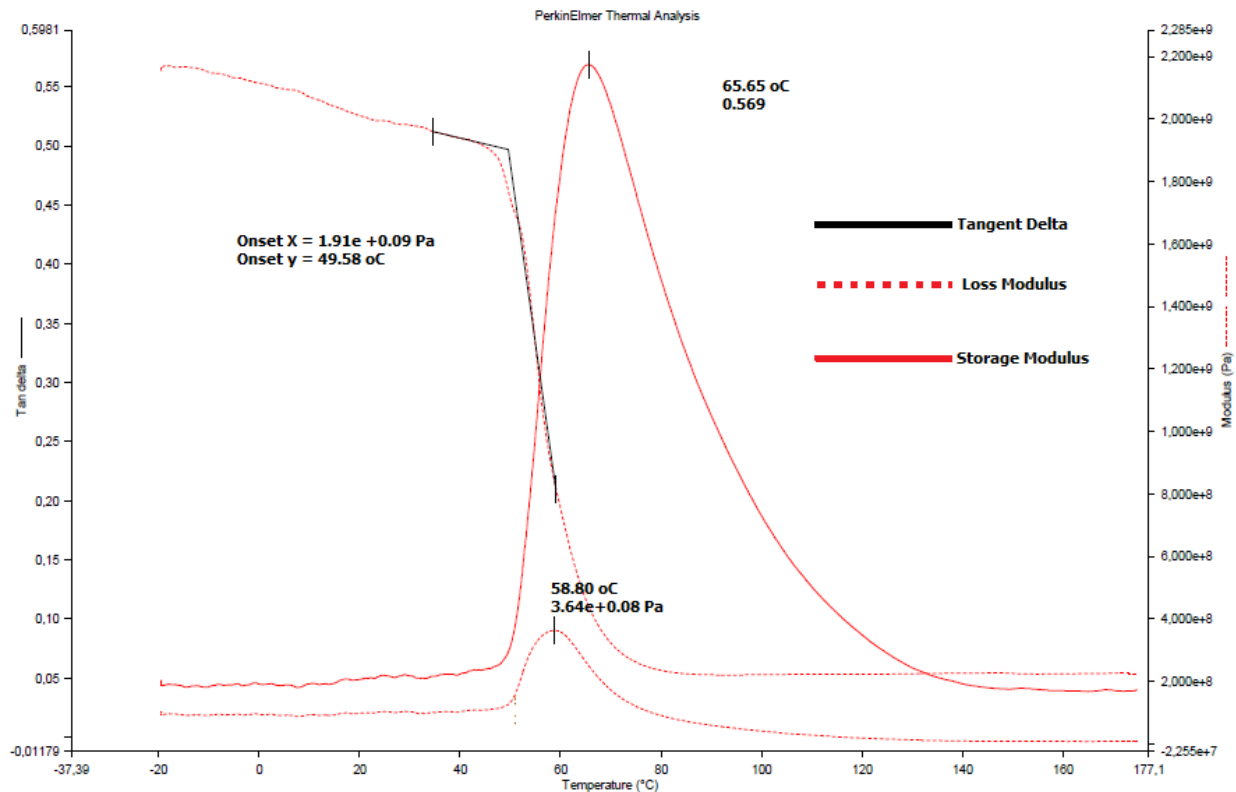


Figura 68 - Curvas de DMA para os compostos de epóxi incorporados com o volume de 10% de fibras de juta.

Os gráficos mostram a dependência de temperatura do módulo de perda, E'' , para o epóxi puro (0% de fibras) e os compostos investigados distintas, 10, 20 e 30%. As curvas nas figuras 2, 3, 4 e 5 revelam uma das empresas substanciais também diminuir em amplitude com a incorporação de fibra de juta. A temperatura para os picos E'' é aparentemente a mesma para todos os compósitos investigada com valores em torno de 65 ° C. Segundo Mohanty *et al* (2006) esses picos E'' , são conhecidos como os picos α de relaxamento estrutural. A introdução de uma fibra lignocelulósica afeta esse relaxamento por interferir com a mobilidade da cadeia da matriz polimérica. Mohanty *et al*, 2006, também sugeriram que os picos α em E'' poderia estar relacionada com uma temperatura de transição vítrea da matriz polimérica.

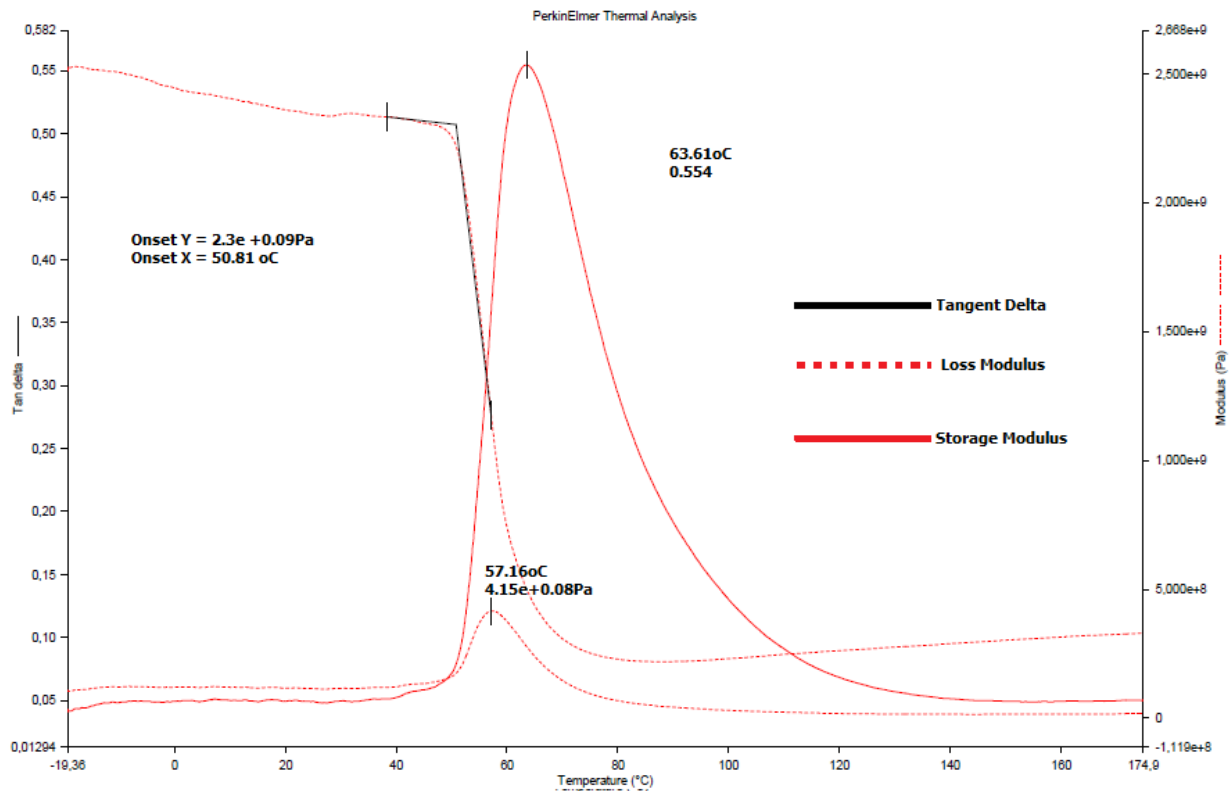


Figura 69 - Curvas de DMA para os compostos de epóxi incorporados com o volume de 20% de fibras de juta.

As figuras 67, 68, 69 e 70 mostram a variação também como do δ para o epóxi puro (0% de fibras) e os compósitos com infusão de juta como uma função da temperatura. O principal aspecto a ser observado é a existência de picos característicos localizados a uma temperatura, que pode ser atribuído ao limite superior da temperatura de transição vítrea, T_g . Para a amostra de epóxi puro (0% de fibra), como o pico δ , tem uma amplitude significativamente inferiores aos dos compósitos de fibra de juta. Além disso, a sua temperatura de cerca de 54°C, é menor do que para esses compósitos de fibras de juta no intervalo de 57 a 59°C. Este resultado sugere que a incorporação de fibra de juta aumentar a mobilidade das cadeias epóxi. Como consequência da transição do vidro para o estado de borracha pode ocorrer à temperatura mais elevada.

Uma situação semelhante foi encontrado para compósitos de epóxi incorporadas com fibras de rami (Rodriguez *et al*, 2011). Neste caso, a resistência da fibra/matriz interfacial poderia desempenhar um papel na explicação do presente comportamento. São as fibras de juta propôs que possuem uma fraca adesão à

matriz epóxi macromoléculas sua permitindo a ter maior mobilidade perto das superfícies de fibra.

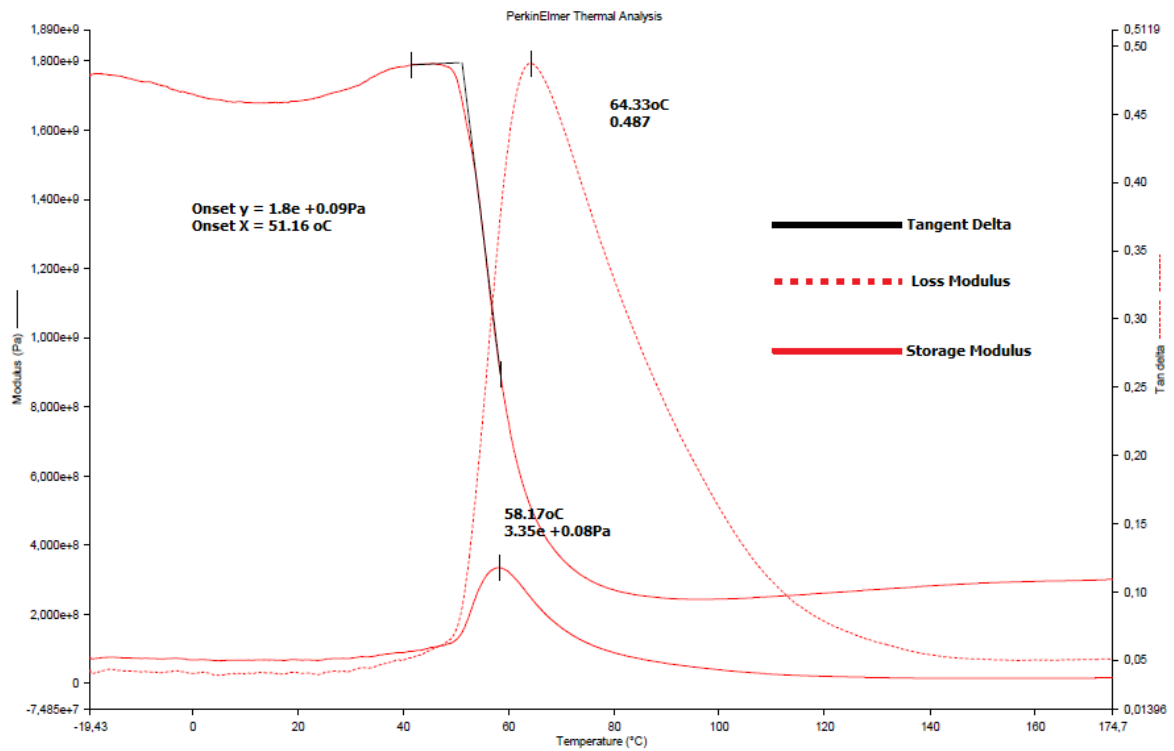


Figura 70 - Curvas de DMA para os compostos de epóxi incorporados com o volume de 30% de fibras de juta.

6. CONCLUSÕES

- A análise estatística de Weibull das fibras de juta, mostrou uma correlação inversa com seus diâmetros, o que já era esperado para uma fibra lignocelulósica. As fraturas das fibras revelaram um mecanismo de propagação de trinca longitudinal entre as fibrilas antes do final da ruptura da fibra. Sugere-se que este mecanismo estaria associado com a ruptura prematura de fibras mais grossas em comparação com as fibras mais finas, assim é explicado a correlação inversa.
- Ensaio de pullout de fibra de juta permitiu estimar um limite para o comprimento crítico de 3 mm, o que é comparável a outros encontrados para diferentes fibras lignocelulósicas. Com base nesse comprimento crítico, um limite inferior para a tensão de cisalhamento de interface foi avaliada como 0,94 MPa.
- Para o ensaio de tração, o aumento da incorporação de fibras contínuas e alinhadas de juta eleva significativamente a resistência à tração e rigidez de compósitos de matriz polimérica. As macro e microestruturas indicam que a fibra de juta age como barreira eficaz para a propagação da ruptura na frágil matriz polimérica, sendo de grande importância para a melhoria das propriedades mecânicas do compósito. As fibras de juta tem um duplo papel, a resistência mecânica do compósito, fazendo com que as rachaduras na interface fibra/matriz iniciem sua propagação, permitindo a ruptura súbita no caso de fração de 10% de juta. Além disso, a fibra também tem um papel de barreira à propagação de trincas no caso de frações superiores a 20%, contribuindo para um aumento efetivo da resistência no compósito.
- Para os ensaios de flexão os compósitos de matriz poliéster apresentam um decréscimo na resistência à medida que se aumenta a fração volumétrica de fibras. O módulo de elasticidade passa por um máximo para 10% em volume de fibra de juta e depois também decresce. As fibras de juta, embora tenham elevada resistência mecânica, estão associadas a uma fraca interface com a matriz de poliéster. Isto permite que trincas que esbarram nas fibras prossigam através da sua superfície, contribuindo para a ruptura do compósito. Já os compósitos de

matriz epóxi apresentaram resultados positivos, com o aumento da resistência e tenacidade.

- Nos ensaios de impactos, Charpy e Izod, os compósitos poliméricos de juta apresentam um elevado aumento na tenacidade, em função da fração em peso de fibra. Este aumento na tenacidade é, sobretudo, devido à relativamente baixa tensão interfacial cisalhante entre a matriz de poliéster e as fibras de juta, o que ocasiona maior energia associada ao descolamento da fibra, formando maior área na interface. Para frações de fibra de juta superiores a 20%, o aumento da tenacidade é também devido à grande energia utilizada na ruptura das fibras de juta que se descolam da matriz de poliéster durante os ensaios de impactos. A maioria dos corpos de provas aumentou a resistência devido à baixa tensão de cisalhamento interfacial juta fibra/matriz. Isso resulta em uma maior energia absorvida como consequência de uma propagação longitudinal das fissuras em toda a interface, que gera áreas de ruptura maiores, em comparação com uma fratura transversal.
- O comportamento térmico de fibra de juta analisado por TGA, DTG e DSC revelou evidências de perda de água e decomposição estrutural. Entre 80- 100°C, aproximadamente, 10% de umidade da fibra é liberada, essa perda de massa inicial é referente a água das fibras lignocelulósicas. A decomposição estrutural esta associada perda máxima de massa, com picos claros em 339,95°C em atmosfera de oxigênio. A incorporação de fibras de juta provoca uma diminuição da temperatura de início de degradação do compósito, que caracteriza o início de uma segunda fase de uma maior perda de massa. Picos secundários, observados apenas nos compósitos, foram atribuídos a decomposição de hemicelulose e celulose contida nas fibras de juta. Os aumentos térmicos de resíduos finais de degradação em proporção com a quantidade de fibra de juta, devido à maior formação da matéria carbonato e alcatrão/char.
- O módulo de perda, E'' , mostra uma diminuição da amplitude do pico de relaxamento α com a incorporação de fibra na matriz polimérica. No entanto, a temperatura para os picos E'' e α permanecem praticamente constante para incorporação com fibra de juta. A amplitude do pico é tão δ também aumentou

significativamente com a incorporação de fibra de juta. A temperatura do pico é deslocada para temperaturas mais elevadas, que indica um decréscimo na mobilidade das cadeias poliméricas. A interface de matriz/fibra é fraca, o que permite maior mobilidade da cadeia perto da superfície da fibra.

- Todos os ensaios e análises realizadas para esta tese apresentaram resultados significativamente melhores para os compósitos confeccionados com a resina epóxi.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AGARWAL, B.D.; BROUNTMAN, L.J. (1990) Analysis and Performance of Fiber Composites, *Nova York: John Wiley & Sons*.
- ALBINANTE, S. R., PACHECO, É. B. A. V., VISCONTE, L. L. Y. (2013) Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. *Química Nova*, vol. 36, n. 1, p. 114-122.
- ALONSO, T. V., (2013) Estudo da reação de formação de adutos gerados por resina epóxi e polialquileno glicóis. *Dissertação de Engenharia Química*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ALVES, R.T. (2008) Embrapa Cerrados celebra centenário da imigração japonesa. *Cerrados Informa*. Planaltina, v. 9, n. 88, p. 2.
- AQUINO, R.C.M.P., MONTEIRO S.N., D'ALMEIDA J.R.M. (2003) Evaluation of the Critical Fiber Length of Piassava (*Attalea funifera*) Fibers using the Pullout Test, *J. Mater. Sci. Letters*, v. 22, p. 1495-1497.
- ARAÚJO, C. R. (2003) “Cinética de Decomposição Térmica de Compósitos Poliméricos com Fibras de Curauá”, *Tese de Doutorado, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil*.
- ASHBEE, K.H.G. (1993) Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites, *Lancaster, Inglaterra: Technomic Pub. Co. Inc.*
- BARBOSA, A. P., (2011) Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti. *Tese de Engenharia e Ciências de Materiais*. Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- BEVITORI, A. B., SILVA, I. L. A., LOPES, F. P. D., MONTEIRO, S. N. (2010) Comportamento mecânico em flexão de compósitos pós-curados de poliéster

incorporados com fibras contínuas e alinhadas de juta. *Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração*.

BEVITORI, A. B., SILVA, I.L.A., LOPES, F.P.D., MONTEIRO, S.N. (2010) Diameter dependence of tensile strength by Weibull analysis: Part II jute fiber, *Rev. Mater.*, v. 15(2), p. 125-131.

BLEDZKI, A .K., GASSAN, J. (1999) Composites Reinforced With Cellulose-Based Fibers. *Prog. Polym. Sci*,v. 4, p. 221-274.

BLEDZKI, A. K., ZHANG, W. & CHATE, A. (2001) *Composites Science. And Technology*, 61, p.2405.

CALLISTER JR., W.D. (1994) *Materials Science and Engineering – An Introduction*, 3 ed., New York, NY: John Wiley & Sons, p. 769.

CALLISTER, W.D. (2002) *Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução*. 5ª edição, São Paulo: Editora LTC, p. 99- 357.

CASTRO, A. J., (2003) Resina poliéster: caracterização e estudo das condições de cura e propriedades mecânicas. *Trabalho submetido ao Curso de Graduação em Química*, Universidade Federal de Santa Catarina.

CROCKER, J. (2008) “Natural materials innovative natural composites”. *Materials Technology*, v. 2-3, p. 174-178.

DIETER, G. E., (1988) *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw-Hill Book Company. p. 74-79.

DOAN, T.-T.-L., BRODOWSKY, H., MÄDER, E. (2007) Jute fibre/Polypropylene composites. II. Thermal hydrothermal and dynamic mechanical behavior. *Compos Sci. Technol.* v. 67, p. 2707-2714.

- FERREIRA, A.S., RODRIGUEZ, R.J.S., LOPES, F.P.D., MONTEIRO, S.N. (2010) Thermal analysis of curaua fiber reinforced polyester matrix composites. *In: Characterization of Minerals, Metals and Materials Symposium – TMS Conference, Seattle, WA, EUA, March 2010*, p. 1-7.
- FU, S.Y., LAUKE, B., MÄDER, E., HU, X., YUE, C. Y. (1999) Fracture resistance of short-glass-fiber-reinforced and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene under Charpy impact load and its dependence on processing, *J. Mater. Process. Technol.*, v. 89-90, p. 501-507.
- GAÑAN, P., MONDRAGON, I. (2003) Thermal and degradation behavior of fique fiber reinforced thermoplastic matrix composites. *J. Therm. Anal Cal.* v. 73, n. 3, p. 783-795.
- GAY, D., (1991) *Matériaux Composites*, Editions Hermes Paris, France.
- HOMMA, A. K.O. (2005) Amazônia: como aproveitar os benefícios da destruição? *Estudos Avançados, São Paulo*, v. 54, n. 19, p. 115-135.
- KELLY, A., TYSON, W.R. (1965) *High Strength Materials*, New York: Wiley.
- LI, Y.; MAI, Y.- W.; YE, L. (2000) Sisal fiber and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology.* v. 60, p. 2037-2055.
- LIMA, A. C., (2009) Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado. *Tese de Engenharia e Ciências de Materiais*. Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- MARSH, G. (2003) Next step for automotive materials, *Mater. Today*, v. 6(4), p. 36-43.
- MELLO, M.L.S., CONTENTE, S., VIDAL, B.C., PLANDING, W., SCHENCK, U. (1995) Modulation of ras transformation affecting chromatin supraorganization as assessed by image analysis. *Exp. Cell Res*, v. 220, p. 374-382.

- MELLO, N. C., FERREIRA, F. C., CURVELLO, A. A. S., COLNAGO, L. A. & MATTOSO, L. H. C. (1995) “Estudos e caracterização de sisal “in natura” e sisal benzilado por RMN CPMAS de 13C”, in: *Anais do 3º Congresso Brasileiro de Polímeros*, p.1349.
- MOHANTY, A. K., KHAN, M. A., HINRICHSEN, G. (2001) Influence of Chemical Surface Modification on the Properties of Biodegradable Jute Fabrics-Polyester Amide Composites. *Composites: Part A*, v. 31, p. 143-150.
- MOHANTY, A.K. MISRA, M., DRZAL, L.T. (2002) Sustainable biocomposites from renewable resources: opportunities and challenges in the green material world, *J. Polym. Environ.*, v.10, p. 19-26.
- MOHANTY, A.K., MISRA M., HINRICHSEN, G. (2000) Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromolecular Mat. and Engineering*, v. 276/277, p. 1-24.
- MOHANTY, S. VERMA, S. K., NAYAK, S. K. (2006) Dynamic Mechanical and Thermal Properties of MAPE Treated Jute/HDPE Composites. *Composites Science and Technology*, v. 66, p. 538-547.
- MONTEIRO, S. N. (2009) “Properties and structure of *Attalea funifera* piassava fibers for composite reinforcement”, *J. Natural Fibers*, 6 (2) 191-203.
- MONTEIRO, S. N., SATYANARAYANA, K. G., LOPES, F. P. D. (2010) “High strength natural fibers for improved polymer matrix composites”, *Materials Science Forum*, 638-642 961-966.
- 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, p. 17-22.

- MONTEIRO, S.N., AQUINO, R.C.M.P., LOPES, F.P.D. (2008) Performance of curaua fibers in pullout tests”. *J. Materials Science*, v. 43, p. 489-493.
- MONTEIRO, S.N., DE DEUS J.F., AQUINO, R.C.M.P., D’ALMEIDA J.R.M. (2006) Pullout tests of coir fiber to evaluate the interface strength in polyester composites, *Proceedings of the TMS 137th Annual Meeting & Exhibition*, (San Antonio, USA, Feb.) p. 1-8.
- MONTEIRO, S.N., MARQUES, L.S., SATYANARAYANA, K.G. (2010) “Characterization of the flexural properties of polyester matrix composites reinforced with continuous jute fibers”. *Proceedings of the Characterization of Minerals, Metals & Materials – TMS Conference 2010* (Seattle, WA, USA, February) 1-8.
- MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; CARVALHO, E.A.; D’ALMEIDA, J.R.M. (2006) Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. *Revista Matéria*, v. 11, n. 3, p. 197-203.
- MOTHE, C.G., ARAUJO, C.R., OLIVEIRA, M.A., YOSHIDA, M.I. (2002) Thermal decompositions kinetics of polyurethane composites with bagasse of sugar cane, *J. Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 67, p. 305-312.
- NABI SAHED, D., JOG, J.P. (1999) “Natural fiber polymer composites: a review”, *Advances in Polymer Technol.*, v. 18, p. 221-274.
- NASCIMENTO, D. C. O., MOTTA, L. C., MONTEIRO, S. N. (2010) “Weibull analysis of Tensile tested piassava fibers with different diameters”. *Proceedings of the Characterization of Minerals, Metals and Materials – TMS Conference 2010* (Seattle, WA, USA, February) 1-8.
- NETO, J. R. A., CARVALHO, L. H., ARAÚJO, E. M. (2007) “Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, nº 1, p. 10-15.

- NGUYEN, T., ZAVARIN, E., BARRAL, E.M. (1981) Thermal analysis of lignocellulosic material. Part I – Unmodified materials. *J. Macromol. Sci. – Rev. Macromol. Chem.* v. C 20, p. 1-65.
- OKUBO, K., FUJII, T., YAMASHITA, N. (2005) Improvement of interfacial adhesion in bamboo polymer composite enhanced with micro-fibrillated cellulose, *JSME Int. J. A. Solid M.* v. 48 p. 199-204.
- PARK, J.M., SON, T. Q., JUNG, J.–G. (2006) Interfacial evaluation of single ramie and kenaf fiber/epoxy resin composites using micromechanical test and nondestructive acoustic emission. *Composite Interface*, v. 13, p. 105-129.
- RAVEN PH, EVERT RF, EICHHORN SE (2001) A composição molecular das células vegetais. In: Raven P.H.; Evert R. F. and Eichhorn S.E. (orgs). *Biologia Vegetal*. 6ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 17-39.
- REGIANI, A. M. (2000) Eletrólitos sólidos poliméricos à base de polisacarídeos: síntese e caracterização. Tese (Doutorado em Ciências na área de Físico-química) – Instituto de Química de São Carlos, São Paulo.
- RODRIGUEZ, F. (1996) Principles of Polymer Systems. Taylor & Francis. Washington, DC.
- RODRIGUEZ, R. S., BEVITORI, A. B., SILVA, I. L. A., LOPES, F. P. D., MONTEIRO, S. N. (2011). Thermal analysis characterization of ramie fibers with different diameters. In: *Characterization of Minerals, Metals & Materials – TMS Conference*, Feb. 2011. San Diego, USA, p. 1-6.
- ROSA, N. C. G., MARTINS, L. B. S., LOPES, F. P. D., COSTA, L. L., MONTEIRO, S. N., RODRIGUEZ, R. J. S. (2011) Dynamic-mechanical characterization of polyester matrix composites reinforced with banana fiber. *The Minerals, Metals and Materials Society*.

- SANTOS, A. M. (2006) Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia. *Dissertação de Engenharia Mecânica Setor de Tecnologia*, Universidade Federal do Paraná.
- SANTOS, F. A., QUEIRÓZ, J. H., COLODETTE, J. L., FERNANDES, S. A., GUIMARÃES, V. M., REZENDE, S. T. (2012) Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, vol. 35, n. 5, 1004-1010.
- SATYANARAYANA, K.G. GUIMARÃES, J.L. WYPYCH, F. (2007) Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites: Part A*, v. 38, p. 1694-1709.
- SILAEX. Silaex química Ltda. 2006 – Disponível em: <<http://www.silaex.com.br>>. Acesso em: 08 maio. 2011.
- SILVA, I. L. A., BEVITORI, A. B., LOPES, F. P., MONTEIRO, D. S.N. (2011) Pullout teste of jute fiber to evaluate the interface shear stress in polyester composites, *TMS*.
- SILVA, I. L. A., BEVITORI, A. B., SILVA, V. B., LOIOLA, R. L., MARGEM, F. M., MONTEIRO, S. N. (2012) Mechanical behavior in bending of jute fiber reinforced epoxy matrix composite. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais*.
- SILVA, R., SHIRANI K. HARAGUCHI, MUNIZ E. C., RUBIRA, A. F. (2009) Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. *Química Nova*, v. 32, n 3, 661-671.
- SUH, D.J., LIM, Y.T., PARK, O.O. (2000) *Polymer*, 41, p.8557.
- SYDENSTRICKER, T.H.D., MOCHNAZ, S., AMICO, S.C. (2003) Pull-out and other evaluation on sisal-reinforced polyester biocomposites, *Polym. Testing*, v. 22, p. 375-380.

- WAMBUA P, IVENS J, VERPOEST I. (2003) Natural fibres: Can they replace glass in fiber reinforced plastics?. *Composites Science and Technology*, 63(9), p. 1259-1264.
- WAMBUA, P., VANGRIMDE, B., LOMOV, S., VERPOEST, I. (2007) The Response of Natural Fiber Composites to Ballistic Impact by Fragment Simulating Projectiles. *Composite Structures*, v. 77, p. 232-240.
- WIELAGE, B., LAMPKE, T., MARX, G., NESTLER, K., STARKE, D. (1999) Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis of natural fibres and polypropylene, *Thermochimica Acta*, v. 337, p.169-177.
- YUE, C.Y., LOOI, H.C., QUEK, M.Y. (1995) Assessment of Fibre-Matrix Adhesion and Interfacial Properties Using the Pullout Test. *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, v. 15, p. 73-80.
- ZAH, R., HISCHIER, R., LEÃO, A.L., BROWN, I. (2007) Curaua fibers in automobile industry – A sustainability assessment. *J. Cleaner Production*, v.15, p.1032-1040.