



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS**



Joselito Medeiros de Freitas Cavalcante

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO PARA
INCORPORAÇÃO DE FIOS DE JUTA EM MATRIZ
TERMOPLÁSTICA E CARACTERIZAÇÃO DOS
COMPÓSITOS**

Campina Grande, PB
Outubro, 2008

Joselito Medeiros de Freitas Cavalcante

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO PARA
INCORPORAÇÃO DE FIOS DE JUTA EM MATRIZ
TERMOPLÁSTICA E CARACTERIZAÇÃO DOS
COMPÓSITOS**

Tese apresentada à Banca Examinadora
do Programa de Doutorado em
Engenharia de Processos da
Universidade Federal de Campina
Grande, como exigência parcial para a
obtenção do título de Doutor em
Engenharia de Processos

Orientadora: Profa. Dra. Laura Hecker
de Carvalho

Campina Grande, PB
Outubro, 2008

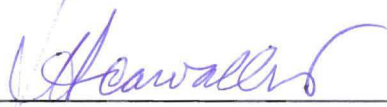
TERMO DE APROVAÇÃO

JOSELITO MEDEIROS DE FREITAS CAVALCANTE

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE INCORPORAÇÃO
DE FIBRAS ALINHADAS E CONTÍNUAS DE JUTA EM MATRIZES
TERMOPLÁSTICAS E CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

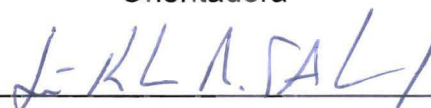
Tese aprovada em 23 de outubro de 2008, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de
Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de
Campina Grande.

COMISSÃO EXAMINADORA



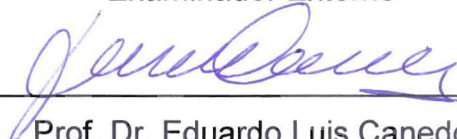
Prof.ª. Dr.ª. Laura Hecker de Carvalho

Orientadora



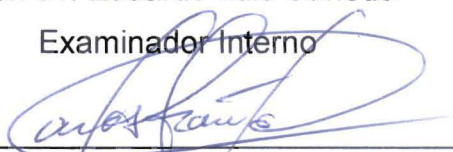
Prof. Dr. José Roberto Moraes D'Almeida

Examinador Externo



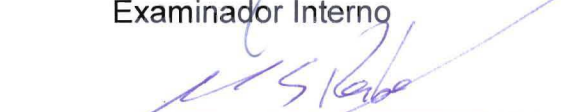
Prof. Dr. Eduardo Luis Canedo

Examinador Interno



Prof. Dr. Carlos José Araújo

Examinador Interno



Prof. Dr. Marcelo Silveira Rabello

Examinador Interno

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Cauê,
Claudenice, Marlene e Freitas
(in memoriam)

AGRADECIMENTOS

À Deus por me proteger e me guiar sempre.

À Profa. Dra. Laura Hecker de Carvalho pela orientação, revisão, sugestão e discussões durante a realização deste trabalho.

Ao Instituto Centro de Ensino Tecnológico, pela liberação das atividades acadêmicas.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pela realização das micrografias e ao Prof. Dr. José Roberto d'Almeida, pela análise das mesmas.

À minha esposa Claudenice, ao meu filho Cauê e a minha mãe Marlene, pelo apoio incondicional durante a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Manutenção Industrial da Fatec-Cariri, pela compreensão durante os dois anos de afastamento.

Aos funcionários dos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais, pela ajuda e cooperação.

E, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

As fibras vegetais são utilizadas em compósitos poliméricos devido ao seu baixo peso e custo e por apresentarem boas propriedades mecânicas. Além disto, são provenientes de fontes renováveis, não são tóxicas e apresentam uma baixa abrasividade. Devido a isto, os compósitos produzidos com fibras naturais podem ser considerados ecologicamente amigáveis. As fibras vegetais são mais utilizadas como reforço em matrizes termofixas, porém nos últimos anos vêm crescendo o interesse por compósitos com matriz termoplástica. Normalmente, para esta última, são utilizadas fibras curtas. Entretanto, a utilização de fibras curtas não gera produtos com boas propriedades mecânicas. Porém quando as fibras vegetais são alinhadas, longas e contínuas, suas potencialidades máximas de reforço são repassadas ao compósito. Sendo assim neste trabalho foi desenvolvida uma técnica para se incorporar fibras longas, alinhadas e contínuas de juta em matrizes termoplástica. O processo se caracteriza por utilizar dois passos distintos, a saber: 1) *filament winding* – onde fios da fibra desejada são dispostos sobre uma placa metálica envolvida por filmes da matriz termoplástica, seguido de 2) recobrimento da placa com outros filmes de matriz termoplástica e compressão do conjunto a quente. O produto obtido (placas contendo fibras longas e alinhadas, recobertas por matriz termoplástica) é então empilhado na sequência de orientação desejada e consolidado por compressão a quente mais uma vez para formar os compósitos propriamente ditos. Os compósitos obtidos foram caracterizados mecanicamente (em tração, flexão e impacto), em função do teor de fibra, do fio de juta utilizado (classificados como 10/1 - formado por uma única perna; e 10/2 - formado por duas pernas) e do índice de fluidez da matriz. Os resultados demonstraram que a incorporação dos fios de juta à matriz termoplástica provoca aumentos significativos na resistência à tração, no módulo de elasticidade (tanto em tração, quanto em flexão) e ao dobramento. Por outro lado, a resistência ao impacto dos compósitos foi reduzida se comparada à da matriz.

Palavras-chave: Compósitos, fios de juta, termoplástico, propriedades mecânicas

ABSTRACT

Vegetable fibers can and are used to reinforce polymer matrices with varying degrees of success. The interest in investigating the viability of incorporating these fibers into polymers is associated with their availability, lightweight, low cost, good set of mechanical properties and environmental concerns as these fibers come from renewable sources, are non toxic, non abrasive to processing equipment and degrade fairly easily. Thus, composites reinforced with these fibers would be considered to be ecofriendly. The use of vegetable fibres as reinforcement in thermoset matrices is well established. In the last decades, thermoplastic/vegetable fiber composites are being intensively investigated. However, in general, thermoplastic composites are reinforced with short fibers as these matrices are commonly extruded and/or injection molded, which limits composite property enhancement. Thus, in order to obtain thermoplastic/vegetable fiber composites with better mechanical properties, we have developed a method to manufacture long, continuous, aligned thermoplastic composites. The process consists of aligning and winding fiber yarns around a metal plate, sandwiching them with plastic films and compression molding. The plates can then be stacked in different arrangements and consolidated by hot compression. In this work the tensile, flexural and impact properties of PP and LDPE/jute yarn composites, manufactured by the method described, were determined. Two polypropylene (PP) and one polyethylene (LDPE) matrices with different molecular weights were used as the matrix and two jute yarns (classified as 10/1 and 10/2) were used as reinforcement and used in the manufacture of composites having different fiber contents and orientations. Our data shows that the method proposed is viable and that significant property enhancements were achieved. Tensile strength and modulus significantly increased with fiber incorporation and content, although for the latter, better properties were achieved for composites having 2 reinforcing layers. It is believed this behavior may be associated with fiber impregnation and/or interface quality. The same trend was observed for flexural modulus and strength. Composite impact strengths were significantly smaller than those of the matrices which is thought to be due to the incorporation of relatively rigid fibers into very ductile matrices. In general, higher moduli (tensile and flexural) were achieved by composites reinforced with the thinner thread (10/1), while those reinforced with the thicker jute thread ended to display higher strength (tensile, flexural and impact).

Keywords: Composites, jute yarn, thermoplastics, mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura química da celulose.....	18
Figura 2 - Representação das regiões cristalinas e amorfas ao longo da microfibrila de celulose	19
Figura 3 - Estrutura química da lignina.....	20
Figura 4 - Estrutura do compósito fibroso natural formado pelos principais constituintes das fibras naturais.....	21
Figura 5 - Esquematização de uma célula unitária de juta.....	22
Figura 6 - Representação da camada S2: (a) Visão em 3D; (b) Visão em 2D. 24	
Figura 7 - Esquema da moldagem por vácuo	34
Figura 8 - Esquema do processo de pultrusão.....	36
Figura 9 - Processo de fabricação de fios contínuos de juta recoberta com fios de polipropileno	36
Figura 10 - Passos do processo de compressão: (a) alinhamento dos fios sob tensão em um quadro vazado, (b) molde e (c) consolidação	37
Figura 11 - Processo <i>filament winding</i> com fibras naturais	38
Figura 12 - (a) Plantas de juta prontas para a colheita; (b) fardos de fibras de juta após a colheita.....	43
Figura 13 - Representação esquemática do esforço sofrido pela fibra e pela matriz na direção 1	56
Figura 14 - Representação esquemática do esforço sofrido pela fibra e pela matriz na direção 2.....	56
Figura 15 - Formas de falhas de um compósito tensionado.....	59
Figura 16 - Rolo de fio de juta	61
Figura 17 - Fios de juta. a) 10/1; b) 10/2	61
Figura 18 - Filme de PELBD produzidos pela Mercur, dobrados ao meio.....	62
Figura 19 - Placa metálica de alumínio envolta por filmes de PELBD.....	64
Figura 20 - (a), (b) e (c) processo manual de incorporação das fibras de juta; (d) placa completamente encoberta pelas fibras alinhadas de juta	65
Figura 21 - Conjunto formado por filme, fibra e filme	66
Figura 22 - Lamina obtida ao final do processo	67
Figura 23 - Filmes de Polipropileno.....	68
Figura 24 - Comportamento mecânico dos compósitos PELBD/fios alinhados de juta - Influência do teor de fibra: módulo elástico e resistência à tração....	77
Figura 25 - Propriedades mecânicas dos compósitos PELBD/fios unidirecionais de juta: Influência do arranjo (módulo elástico e resistência à tração)	78
Figura 26 - Comportamento mecânico dos compósitos PP/fios de juta, em função do número de camadas de reforço (teor de fibra), na direção axial. (a) compósitos com fio 10/1; (b) compósitos com fio 10/2.....	84
Figura 27 - - Comportamento mecânico dos compósitos PP/fios de juta, em função do número de camadas de reforço (teor de fibra), na direção axial. (a) compósitos com fio 10/1; (b) compósitos com fio 10/2.....	85

Figura 28 - Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos em função de tipo de matriz utilizada: (a) compósitos feitos com fio 10/1, e (b) com 10/2.....	86
Figura 29 - Micrografias dos fios 10/1 (a) e 10/2 (b).....	89
Figura 30 - Propriedades mecânicas dos compósitos em função do tipo de fio: (a) compósitos com PP H 103 e, (b) PP H 301.....	90
Figura 31 - Propriedades mecânicas dos compósitos em função da direção da fibra: (a) módulo de elasticidade e, (b) resistência à tração	94
Figura 32 - Propriedades mecânicas dos compósitos com e sem secagem prévia das fibras	96
Figura 33 - Micrografias da superfície de fratura dos compósitos: PP H 103 (a) e (b); e, PP H 301 (c) e (d), com duas camadas de fio 10/2.....	98
Figura 34 - Micrografias dos compósitos com duas camadas de fios de juta referencia 10/2, com e sem secagem prévia das fibras.....	100
Figura 35 - Comportamento idealizado do módulo elástico em função do volume de fibra em um compósito	102
Figura 36 - Análise gráfica para se determinar o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos fios de juta: (a) fio 10/1 e PP H 103; (b) fio 10/1 e PP H 301; (c) fio 10/2 e PP H 103; e, (d) fio 10/2 e PP H301	104
Figura 37 - Comparação entre os módulos de elasticidade, experimental e teórico: (a) H 103 e fio 10/1; (b) H 301 e fio 10/1; (c) H 103 e fio 10/2; e, (d) H 301 e fio 10/2	107
Figura 38 - Comparação entre as resistências à tração, experimental e teórica: (a) H 103 e fio 10/1; (b) H 301 e fio 10/1; (c) H 103 e fio 10/2; e, (d) H 301 e fio 10/2.....	110
Figura 39 - Predição teórica do módulo de elasticidade dos compósitos: a) H 103 e fio 10/1; b) H 301 e fio 10/1; c) H 103 e fio 10/2; e, d) H 301 e fio 10/2	114
Figura 40 - Comportamento teórico para o módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibra para os compósitos produzidos com fio 10/2 e com as matrizes (a) H 103 e (b) H 301, com $G_f = 5 \text{ GPa}$	116
Figura 41 - Ajuste dos valores de resistência à tração teóricos com os experimentais para os compósitos: (a) H 103 e fio 10/1; (b) H 301 e fio 10/1; (c) H 103 e fio 10/2; e, (d) H 301 e fio 10/2.....	119
Figura 42 - Resistência à tração teórica em função da fração volumétrica e da direção das fibras, para os compósitos com fio 10/2 e matriz (a) H 103 e (b) H 301	121
Figura 43 – Compósitos com duas e três camadas	124
Figura 44 - Resistência à flexão em função do tipo de matriz, de fio e número de camadas	124
Figura 45 - Módulo de elasticidade em função da matriz, do tipo de fio e do número de camadas	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de extração e quantidade produzida de algumas fibras naturais.....	16
Tabela 2- Composição química (%) de algumas fibras naturais	17
Tabela 3 - Propriedades mecânicas de algumas fibras orgânicas e inorgânicas	24
Tabela 4 - Quantidade de umidade presente em algumas fibras naturais a 27°C	25
Tabela 5 - Propriedades tênses de alguns compósitos reforçados com fibras vegetais alinhadas e aleatórias.....	29
Tabela 6 - Composição química da fibra de juta	43
Tabela 7 - Características e propriedades da fibra de juta.....	44
Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas do PEBDL	62
Tabela 9 - Propriedades típicas do PP H 301e H103.....	63
Tabela 10 - Configuração dos compósitos com PELDB.....	67
Tabela 11 - Semelhanças e diferenças entre os processos com PELBD e PP 70	
Tabela 12 - Propriedades mecânicas dos compósitos PELBD/fios unidirecionais de juta.....	76
Tabela 13 - Propriedades mecânicas, em tração, dos compósitos PP/fios de juta, em função do teor, do arranjo e do tipo de fio.....	81
Tabela 14 - Propriedades dos fios de juta.....	88
Tabela 15 - Propriedades mecânicas dos compósitos em diferentes direções	92
Tabela 16 - Comparação entre os compósitos produzidos com e sem secagem prévia das fibras	96
Tabela 17 - Estimativa do módulo elasticidade e da resistência à tração para os fios 10/1 e 10/2, baseado em valores médios	104
Tabela 18 - Valores médios estimados para a tensão de cisalhamento dos compósitos em estudo.....	120
Tabela 19 - Resultados mecânicos em flexão.....	122
Tabela 20 – Resistência ao impacto dos compósitos.....	127

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIÇÕES

V_f – Fração volumétrica de fibra;

v_f – Volume de fibra;

v_m – Volume de matriz;

V_m – Fração volumétrica de fibra;

ϵ – Deformação;

E – Módulo de elasticidade;

σ – Resistência à tração;

Subscrito 1 ou x – Direção axial;

Subscrito 2 ou y – Direção transversal;

Subscrito m – Referente à matriz;

Subscrito f – Referente à fibra;

Subscrito xy – Referente ao compósito;

G – Módulo de cisalhamento;

τ - Tensão de cisalhamento;

ASTM – *America Society of Testing Materials*;

PP – Polipropileno;

PELBD – Polietileno linear de baixa densidade;

E_B - Módulo de elasticidade ao dobramento (MPa);

L - Distância entre os apoios do corpo de prova (mm);

b - Largura da seção transversal do corpo de prova (mm);

d - Altura da seção transversal do corpo de prova (mm);

m - Declive da tangente à porção retilínea inicial da curva carga-deformação;

ν - Coeficiente de Poisson.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	4
2. Objetivos	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Objetivo Geral.....	4
2.3 Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO III.....	6
3. Revisão Bibliográfica.....	6
3.1 Compósitos	6
3.2 Classificação dos Compósitos.....	6
3.3 Fibras, Matriz e Interface.....	8
3.4 Mecanismos de Adesão	9
3.5 Fatores que Afetam as Propriedades dos Compósitos.....	11
CAPÍTULO IV	15
4. Compósitos com Fibras Naturais.....	15
4.1 Fibras Naturais	15
4.1.1 Estrutura e Métodos de Produção.....	16
4.1.2 Propriedades.....	17
4.1.3 Absorção de Umidade e Durabilidade.....	25
4.1.4 Meio Ambiente/Toxicidade	27
4.2 Própriedades Mecânicas dos Compósitos com Fibras de Origem Vegetal....	27
4.3 Métodos de Produção de Compósitos com Fibras de Origem Vegetal.....	29
4.3.1 Compósitos com Matriz Termofixa	29
4.3.2 Compósitos com Matriz Termoplástica	30
4.4 Aplicação dos compósitos com fibras naturais.....	38
CAPÍTULO V	41
5.1 Compósitos com fibra de juta	41
5.1.1 Fibra de juta.....	41
5.1.2 Compósitos com matrizes termoplásticas (polietileno e polipropileno)	45
CAPÍTULO VI	55
6.0 Modelagem Matemática	55
6.1 Regra das Misturas.....	55
6.3 Equações de Harris e, Hull e Clyne – Para o módulo de elasticidade	57

6.4 Teoria da Máxima Tensão e Critério de Tsai-Hill - Para as tensões.....	58
CAPÍTULO VII	61
7. Materiais e Métodos	61
7.1 Materiais	61
7.2 Metodologia – Desenvolvimento do processo	64
7.3 Ensaio Mecânicos	72
CAPÍTULO VIII	75
8. Resultados e Discussão	75
8.1 O Processo	75
8.2 Propriedades Mecânicas dos Compósitos PELBD/Fios de Juta.....	75
8.3 Propriedades Mecânicas dos Compósitos de PP e Fios de Juta em Tração..	79
8.4 Comportamentos Mecânico dos Compósitos PP/Fios de Juta em Flexão....	122
8.5 Resistência ao Impacto.....	126
CAPÍTULO IX	128
9. Conclusões.....	128
CAPÍTULO X	130
10. Sugestões Para Trabalhos Futuros	130
CAPÍTULO XI	131
11. Referencias Bibliográficas	131
ANEXOS.....	139

CAPÍTULO I

1.0 INTRODUÇÃO

As fibras vegetais, por serem compostas principalmente de celulose, são também chamadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas. Estas fibras são abundantes e disponíveis em todo o mundo.

No passado, as fibras vegetais eram utilizadas na fabricação de cordas, fios, carpetes e outros produtos decorativos. Porém, com o avanço no desenvolvimento das fibras sintéticas, houve um decréscimo no consumo das fibras vegetais. Atualmente, devido à “escassez” e ao elevado custo do petróleo, além do crescente apelo ecológico, as fibras naturais voltaram à cena, na produção de compósitos poliméricos. Já que são provenientes de fontes renováveis e biodegradáveis, apresentam baixa densidade, são relativamente duráveis, de fácil secagem e de baixo custo, além de apresentar propriedades mecânicas relativamente boas. (CAVALCANTI, 2000).

As fibras vegetais apresentam algumas dificuldades para serem utilizadas como cargas para materiais poliméricos, dentre elas pode-se citar: a temperatura de degradação e a alta higroscopicidade. A temperatura de degradação das fibras vegetais é relativamente baixa, em torno de 200°C. Nesta temperatura pode ocorrer tanto a degradação propriamente dita, quanto a liberação de voláteis, diminuindo as propriedades mecânicas dos compósitos. Sendo assim, seu uso fica limitado a materiais plásticos com baixa temperatura de processamento, como por exemplo: polietileno, polipropileno, policloreto de

vinila e poliestireno. Em relação à higroscopicidade, a absorção de umidade pode resultar em inchamento das fibras o que pode comprometer a estabilidade dimensional do compósito e diminuir a interação fibra/matriz, fragilizando o compósito.

Apesar destas dificuldades, dentre as fibras vegetais mais utilizadas como reforço em plásticos está a juta, que apresenta um bom conjunto de propriedades mecânicas, disponibilidade e baixo custo (BATISTA, 1995). Estas fibras são aplicadas aos plásticos de várias formas: como fibras curtas em compósitos injetados; como fibras longas e contínuas em compósitos pultrudados; e na forma de tecidos em compósitos feitos pelo processo *hand lay up* e por compressão. Estes últimos processos são mais aplicados em compósitos com matrizes termofixas. Entretanto, devido principalmente a grande produtividade e ao fato de não usar solventes (o que facilita a produção), o uso comercial de compósitos com matrizes termoplásticas vêm crescendo muito nos últimos anos.

Para os compósitos com matriz termoplástica o processo mais comumente utilizado é a injeção, normalmente precedido de uma etapa prévia de mistura, que pode ocorrer em misturadores internos ou em uma extrusora. Porém, o uso de máquinas com roscas, leva a uma quebra das fibras, diminuindo desta forma o seu tamanho médio, produzindo, assim, compósitos com propriedades mecânicas relativamente baixas. Devido a isto, uma série de trabalhos vem sendo desenvolvidos com o intuito de se utilizar fibras longas, contínuas e alinhadas em matriz termoplástica, pois, a utilização destas, por si só, melhora, significativamente, as propriedades mecânicas dos compósitos (FACCA, 2005). As tecnologias utilizadas para este fim vão desde a

modificação do fio, como o *microbraid yarn* (KHONDKER *et al*, 2006) e o *commingled yarn* (MADSEN, 2004), passando por modificações de processos tradicionalmente utilizados para produção de compósitos com matrizes termofixas como a pultrusão (van de VELDE & KIEKENS, 2001; ANGELOV *et al*, 2007) além do processo de compressão. Outras técnicas foram desenvolvidas especificamente para matrizes termoplásticas como o *Express Process* (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma técnica de incorporação de fios longos, alinhados e contínuos de juta em matriz termoplástica, com o intuito de produzir compósitos com boas propriedades mecânicas. Estes objetivos são detalhados na próxima secção.

CAPÍTULO II

2. Objetivos

2.1 Introdução

Há um grande número de pesquisas sobre compósitos de polipropileno e polietileno reforçados com fibras de juta. Entretanto, quase a totalidade destas, são com compósitos com fibras curtas e não-orientadas. É fato, que a utilização de fibras alinhadas, melhora consideravelmente as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos sem a necessidade de utilização de agentes de acoplamento e/ou tratamentos das fibras (MADSEN, 2004). Além disto, o comportamento mecânico destes compósitos é mais facilmente previsto.

2.2 Objetivo Geral

Desenvolver uma forma de incorporar fibras alinhadas e contínuas de juta em matrizes de polietileno e de polipropileno, e caracterizar mecanicamente os compósitos obtidos.

2.3 Objetivos Específicos

- Verificar a influência do teor de fibra e do arranjo dos compósitos nestas propriedades;
- Observar o comportamento mecânico quando se utiliza fios de juta de diferentes diâmetros;
- Estudar o efeito do índice de fluidez nas propriedades mecânicas;
- Verificar o efeito da secagem prévia das fibras nas propriedades mecânicas;

- Aplicar modelos matemáticos simples para prever o comportamento mecânico destes compósitos.

CAPÍTULO III

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Compósitos

À medida que as aplicações tornam-se mais sofisticadas, fica mais difícil para um único material satisfazer a todas as expectativas. Este dilema tem obrigado o homem a conjugar diferentes materiais, através de suas propriedades individuais, para alcançar as características finais desejadas (HAGE Jr., 1989).

O termo compósito é usado em ciência dos materiais para definir um material formado por uma matriz contendo uma fase dispersa. Por definição um material compósito (ou conjugado) consiste da combinação de dois ou mais materiais fisicamente distintos, que mantêm suas propriedades individuais, sem que haja necessariamente interação química extensa entre eles. O objetivo é, através da combinação dos constituintes, obter produtos com propriedades específicas para uma determinada aplicação, incapazes de serem atendidas pelos constituintes individuais do compósito (POWEL, 1983, CALLISTER, 2003).

3.2 Classificação dos Compósitos

Uma das formas de se classificar os compósitos é através do tipo de reforço, sendo assim os compósitos podem ser classificados em (GEORGE & SABU, 1997):

- Compósitos Particulados

Consistem de partículas dispersas em uma matriz. Estas partículas possuem razão de aspecto próximo de 1. Em geral, os reforços são de origem mineral (caulim, carbonato de cálcio...) e, neste caso, normalmente, tem-se um aumento na rigidez sem que haja melhora na resistência à tração do compósito.

- Compósitos Fibrosos

São materiais reforçados por fibras (que, normalmente, apresentam elevado módulo de elasticidade e resistência à tração) embebidas em uma matriz. Os compósitos fibrosos são divididos em duas grandes áreas: os reforçados por fibras curtas e os reforçados com fibras com fibras contínuas. Normalmente as fibras curtas são mais utilizadas como reforço devido, em matrizes termoplásticas, devido a facilidade de fabricação do compósito.

- Compósitos Híbridos

São compósitos em que o reforço consiste da mistura de cargas de origens distintas. Estas podem ser fibrosas ou particuladas ou então consistirem da mistura de cargas fibrosas e particuladas de origem mineral ou orgânica.

- Compósitos Laminados

Nos compósitos laminados, camadas individuais do material são colocadas umas sobre as outras e consolidadas para formar um elemento ou uma placa, podendo-se ou não variar a arquitetura e/ou a natureza do reforço.

3.3 Fibras, Matriz e Interface

a) Tipos de fibras utilizadas como reforço

As fibras são classificadas em duas categorias: naturais e artificiais. Estas últimas podem ainda ser classificadas em regeneradas e sintéticas. As regeneradas são aquelas obtidas a partir de materiais já existentes, como por exemplo, a fibra de vidro obtida da sílica (material inorgânico que ocorre naturalmente). As fibras sintéticas, por sua vez, são obtidas através de reações químicas e/ou por processos térmicos, como exemplo tem-se: náilon, fibras de carbono, Kevlar, dentre outras. As fibras naturais provêm de varias fontes, e podem ser de origem mineral, vegetal ou animal. As fibras de origem mineral ocorrem naturalmente, tendo como maior exemplo o asbesto. As de origem animal provêm de organismos vivos, como por exemplo, a lã que vem de ovelhas, e a seda que é produzida pelo bicho da seda. As fibras de origem vegetal, por sua vez, são classificadas em quatro tipos, dependendo da parte da planta de onde são extraídas: 1) tronco ou caule – ex.: juta, banana; 2) folha – ex.: sisal, abacaxi; 3) fruto – ex.: coco, algodão, e, 4) gramíneas (ex.: bambu, bagaço de cana-de-açúcar) (GEORGE & SABU, 1997).

b) Matrizes

Uma das funções de uma resina polimérica em compósitos é dispersar e envolver a fase reforçante, aglomerando o reforço durante a consolidação. Quando submetida a um carregamento mecânico, deve deformar-se o necessário a fim de distribuir e transferir as tensões para o componente de reforço. A escolha de uma matriz para uma aplicação estrutural deve ser baseada, inicialmente, ao nível de deformação que ela sofre em relação ao

reforço, quando submetida a uma solicitação mecânica. A deformação da matriz deve ser compatível com a deformação máxima do reforço (HAGE Jr., 1989).

Nos compósitos poliméricos, as matrizes podem ser tanto termoplásticas quanto termofixas. A diferença fundamental entre elas está no processamento utilizado para a produção do compósito. As matrizes termoplásticas não passam pelo processo de cura, elas requerem fusão, moldagem e subsequente solidificação. O ganho nas propriedades dos compósitos com matrizes termoplásticas está intimamente ligado ao tamanho médio das fibras presentes nas mesmas (GEORGE & SABU, 1997).

c) Interface

As características da interface dependem das ligações existentes, da configuração e da estrutura ao redor da mesma, e das propriedades físicas e químicas dos constituintes. Como resultado, a interface é extremamente influenciada pelas propriedades individuais dos componentes dos compósitos. Os problemas que ocorrem na interface normalmente são vistos como um tipo de fenômeno de adesão e são algumas vezes interpretados através da estrutura da superfície de contato entre os materiais, isto é, fatores relacionados à superfície tais como molhabilidade, energia livre, presença de grupos polares e rugosidade (GEORGE & SABU, 1997).

3.4 Mecanismos de Adesão

Os mecanismos de adesão são explicados, principalmente, por cinco teorias, quais sejam (CAVALCANTI, 2000):

- adsorção e molhamento – quando duas superfícies eletricamente neutras são colocadas em contato, existe uma atração física que pode ser compreendida considerando o molhamento de superfícies sólidas por líquidos; para um efetivo molhamento da superfície da fibra, o líquido deve cobrir todas as irregularidades da fibra para deslocar todo o ar contido nas reentrâncias da superfície;
- interdifusão – é a ligação entre duas superfícies poliméricas pela difusão das moléculas de uma superfície sobre a outra; a resistência dependerá da quantidade de entrelaçamento molecular e do número de moléculas envolvidas; a interdifusão ocorre em presença de solventes e agentes plastificantes, e o grau de difusão depende da conformação molecular e dos componentes envolvidos;
- atração eletrostática – forças de atração ocorrem entre duas superfícies quando uma delas está carregada positivamente e a outra negativamente, tais como nas interações ácido-base e de ligação iônica; a resistência da ligação dependerá da intensidade das cargas;
- ligação química – o estudo das ligações químicas está relacionado com o uso de agentes de acoplamento, empregados nas fibras para produzir uma ligação entre a fibra e a matriz; a ligação química é formada por um grupo químico da superfície da fibra e um grupo químico compatível na matriz;
- adesão mecânica – a ligação pode ocorrer entre o entrelaçamento das duas superfícies; a resistência dessa interface sob tensão, será elevada se existir um grande número de reentrâncias na superfície da fibra, que possam ser preenchidas pela resina, propiciando a adesão; a resistência sob cisalhamento é muito significativa e depende do grau de aspereza da

superfície e da fibra; os aspectos geométricos não são os únicos fatores que causam adesão mecânica, já que a contração da resina durante o processo de cura e expansão térmica da fibra e matriz, produzem tensões de compressão e cisalhamento na superfície.

3.5 Fatores que Afetam as Propriedades dos Compósitos

a) Fração Volumétrica de Fibra

Um dos fatores mais importantes que afetam as propriedades dos compósitos é a quantidade de fibra presente. Normalmente este valor é expresso em fração volumétrica (V_f), que é definida pela razão do volume de fibra (v_f) pelo volume total do compósito (v_c).

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (1)$$

O mesmo raciocínio é válido para a fração volumétrica da matriz (V_m):

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2)$$

Invariavelmente as propriedades mecânicas de um compósito tendem a aumentar com o aumento da fração volumétrica da fibra. Normalmente existe um teor ótimo de fibra, onde os compósitos apresentam suas melhores propriedades (XANTHOS, 2005).

b) Características dos componentes individuais: fibra e matriz

As propriedades mecânicas de compósitos fibrosos são muito dependentes da resistência e módulo elástico da fibra. A escolha da matriz depende de uma série de fatores que levam em consideração o uso final do

produto, além de propriedades como resistência química e às intempéries, facilidade de fabricação e o baixo custo, além da facilidade de manuseio e conformação (GEORGE & SABU, 1997).

c) Influência da orientação das fibras

A orientação das fibras uma em relação às outras tem uma importância fundamental na resistência e em outras propriedades dos compósitos. Compósitos com fibras alinhadas longitudinalmente apresentam propriedades anisotrópicas e, neste caso, a maior resistência ocorre na direção das fibras. Já na direção transversal, o reforço provocado pelas fibras praticamente não existe. A fratura normalmente ocorre a baixas tensões, em geral menores do que a resistência à tração da matriz. Por outro lado a resistência à compressão na direção longitudinal tende a ser baixa devido ao dobramento das fibras. A resistência à compressão na direção transversal nestes compósitos é limitada pela resistência da matriz e é menor que a resistência à compressão na direção longitudinal.

Em compósitos fibrosos, normalmente, a resistência se encontra entre dois extremos, isto é, entre a resistência da fibra e a da matriz.

Os compósitos com fibras desalinhadas ou laminados com fibras orientadas em diferentes direções, apresentam propriedades isotrópicas, isto é, praticamente as mesmas propriedades em todas as direções (GEORGE & SABU, 1997).

d) Influência do comprimento da fibra

A resistência dos compósitos fibrosos não depende somente da resistência tensil das fibras, como também da quantidade de carga que é transmitida para as fibras. A extensão da carga transmitida é função do comprimento da fibra e da magnitude da interação fibra/matriz (GEORGE & SABU, 1997).

e) Agentes de acoplamento

Estudos sobre materiais compósitos têm mostrado que a ligação entre o reforço e a matriz tem um efeito significativo nas propriedades dos compósitos. Uma boa ligação fibra/matriz pode ser conseguida com o uso de aditivos ou agentes de acoplamento, gerando, portanto uma melhora na interface.

A técnica utilizada para aumentar a compatibilidade e a dispersão da carga na matriz é recobrir a carga com um agente hidrofóbico, compatível com a matriz, antes da incorporação da carga a matriz. Geralmente, os agentes de acoplamento facilitam a transferência dos esforços, através da interface, da matriz para a carga.

Os agentes de acoplamento mais utilizados são os baseados em silano-isocianatos e titanatos. Eles são aplicados a carga antes destas serem incorporadas ao polímero (GEORGE & SABU, 1997).

f) Influência dos vazios

Durante a incorporação das fibras à matriz ou durante a manufatura do compósito, ar ou alguns voláteis podem ser aprisionados no material (bolha). A causa mais comum para o surgimento de vazios é a dificuldade de

deslocamento dos mesmos devido a viscosidade da matriz durante a consolidação. Uma alta concentração de vazios, normalmente, leva a uma baixa resistência à fadiga, a uma grande susceptibilidade à difusão de água, e a uma grande dispersão nas propriedades mecânicas, já que as bolhas atuam como concentradores de tensão (GEORGE & SABU, 1997).

CAPÍTULO IV

4. Compósitos com Fibras Naturais

Nas últimas décadas a utilização de fibras naturais como reforço para plásticos tem sido extensamente explorada. Isto é reflexo das preocupações com a ecologia e com o desenvolvimento auto-sustentado e também porque estas fibras provêm de fontes renováveis, são abundantes, de baixo custo, e possuem um bom conjunto de propriedades mecânicas (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

Nas próximas páginas será feita uma abordagem a cerca das fibras naturais (propriedades e comportamento), enfatizando as fibras de origem vegetal, e dos compósitos poliméricos reforçados por elas.

4.1 Fibras Naturais

As fibras naturais são classificadas de acordo com a sua origem e podem ser provenientes de plantas, de animais ou minerais. As provenientes das plantas ou vegetais, por sua vez, podem ser classificadas pela procedência, em quatro grupos: a) do fruto (ex.: algodão, coco); b) da entrecasca ou caule (ex.: juta, ramie, cânhamo); c) das folhas (ex.: sisal, abacá, banana, corauá); e, d) gramíneas (ex.: bambu, bagaço de cana-de-açúcar). Quando utilizadas em compósitos poliméricos podem gerar um reforço significativo (CLEMONS & CAULFIELD, 2005; MOHANTY & MISRA, 1995).

4.1.1 Estrutura e Métodos de Produção

A produção de fibras de origem vegetal acontece, basicamente, em três estágios: colheita, extração da fibra e processamento. Este último é utilizado para gerar uma fibra com boas características.

Atualmente, não existe um tipo de colheita específica para as fibras que serão utilizadas como reforço em materiais compósitos. Tanto as fibras quanto a colheita são as mesmas utilizadas para outros fins.

O processo de extração das fibras depende de que parte da planta a fibra provém (por exemplo, se é proveniente do caule, da folha ou do fruto), bem como das propriedades requeridas e dos custos envolvidos. Sendo assim, os processos são os mais variados possíveis. Na Tabela 1, estão sumarizados alguns processos de extração de algumas fibras.

Tabela 1 - Processos de extração e quantidade produzida de algumas fibras naturais

Fibra	Processo	Quantidade	Comprimento da fibra (mm)
Banana	manual/raspador	1,5% em peso do talo	300 – 900
Coco	maceração/raspador	8% do fruto	75 – 150
Juta	maceração e batida/química	3 – 4% do talo	1500
Linhaça	maceração/raspagem a seco	20-25% da palha seca	-
Abacaxi	manual/descascador	2,5-3,5%, em peso, da folha verde	900 – 1500
Ramie	Descascador	2,5-3,5%, em peso, da casca	900 – 1200
Sisal	manual (por batida)/maceração microbiológica/descascador	3-4% das folhas verdes	900 - 1200
Cânhamo	manual/maceração	2-4% do talo verde	-

Fonte: (GEORGE & SABU, 1997)

Muitas das fibras naturais utilizadas em compósitos são transformadas em mantas, em tecidos, passam por um processo de fixação com uma pequena quantidade de polímero, ou por modificações para aumentar a trabalhabilidade. Entretanto, esta etapa adicional além de melhorar certas propriedades e facilitar o processamento, aumenta os custos de produção dos compósitos. As fibras naturais, curtas, são incorporadas a matrizes termoplásticas utilizando processamentos já existentes, como a injeção. Entretanto, neste caso, problemas de alimentação da injetora e comprimento final da fibra são extremamente relevantes. Devido a isto alguns métodos de peletização das fibras com o polímero têm sido desenvolvidos (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

4.1.2 Propriedades

4.1.2.1 Composição Química

A estrutura e a composição química das fibras naturais variam muito. Entretanto, algumas generalizações podem ser feitas. As fibras naturais são compósitos poliméricos tridimensionais de alta complexidade, formado por celulose, hemicelulose, pectinas e lignina (CLEMONS & CAULFIELD, 2005). A composição química de algumas fibras naturais é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2- Composição química (%) de algumas fibras naturais

Fibra	Celulose	Lignina	Pectina
Linho	65 – 85	1 – 4	5 -12
<i>Kenaf</i>	45 – 57	8 -13	3 – 5
Sisal	50 – 64	-	-
Juta	45 - 63	12 – 25	4 -10

Fonte: (CLEMONS & CAULFIELD, 2005)

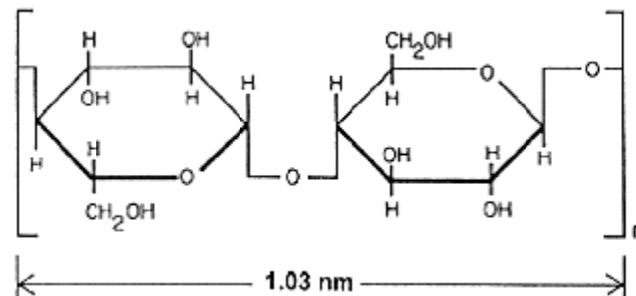
Dos três maiores constituintes das fibras naturais, a celulose é a que apresenta a menor variação na sua estrutura química e é considerado o maior

componente estrutural da fibra (CLEMONS & CAULFIELD, 2005). Ela é um β -1,4-poliacetal de celubiose isotático. A unidade básica, celubiose, é composta de duas moléculas de glucose. Como resultado, a celulose também pode ser chamada de poliacetal de glucose. A fórmula química da celulose é mostrada a seguir (BLEDZKI & GASSAN, 1997):



Onde: P – é o grau de polimerização, que pode chegar a 10.000 (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

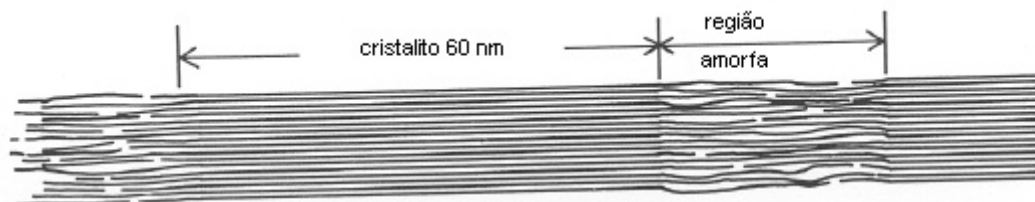
A celulose é formada por 44,4% de carbono, 6,2% de hidrogênio e 49,4% de oxigênio e apresenta um massa molar de 162 u.m.a.(BLEDZKI & GASSAN, 1997). Sua estrutura química é mostrada na Figura 1 (MADSEN, 2004).



Fonte: (MADSEN, 2004)

Figura 1 - Estrutura química da celulose

A celulose sólida forma uma estrutura microcristalina com regiões extremamente ordenadas (cristalinas), e regiões com baixa ordenação (amorfas), como ilustrado na Figura 2. A linearidade da molécula de celulose faz com que a mesma apresente uma alta anisotropia com uma resistência teórica de 15 GPa na direção da cadeia (MADSEN, 2004).



Fonte: (MADSEN, 2004)

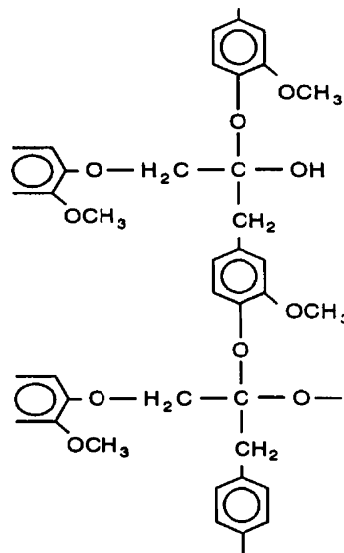
Figura 2 - Representação das regiões cristalinas e amorfas ao longo da microfibrila de celulose

Por ser o principal componente, a celulose é responsável pela resistência, dureza e estabilidade física das fibras naturais (CLEMONS & CAULFIELD, 2005). Estas propriedades são dependentes do tipo de celulose (tipo I ou II), pois cada tipo possui uma célula unitária com geometria específica e estas condições geométricas determinam as propriedades mecânicas (BLEDZKI & GASSAN, 1997). Por outro lado, tratamentos químicos e/ou físicos podem diminuir o grau de cristalinidade da celulose (MADSEN, 2004).

A hemicelulose por sua vez é um grupo heterogêneo de polissacarídeos com uma combinação que varia entre os diferentes tipos de fibras naturais e inclui uma série de carboidratos, como a glucose, galactose, manose, xilose e arabinose (MADSEN, 2004). A hemicelulose difere da celulose em três pontos (BLEDZKI & GASSAN, 1999):

1. contém diferentes unidades de açúcares enquanto que a celulose só apresenta um;
2. exibe um considerável grau de ramificação das cadeias, enquanto a celulose é um polímero estritamente linear;
3. o grau de polimerização da celulose nativa é de dez a cem vezes superior ao da hemicelulose.

A lignina é um polímero altamente ramificado composto por unidades de fenilpropano arranjados em uma estrutura tridimensional extremamente complexa (MADSEN, 2004). A estrutura química varia de acordo com a sua origem. A lignina é menos polar que a celulose e age como um adesivo químico dentro e entre as fibras (CLEMONS & CAULFIELD, 2005). As propriedades mecânicas da lignina são bem inferiores as da celulose, apresentando um módulo elástico da ordem de 4 GPa (BLEDZKI & GASSAN, 1997). A estrutura química da lignina está representada na Figura 3.

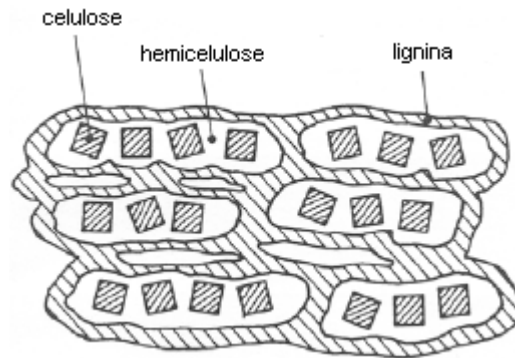


Fonte: (BLEDZKI & GASSAN, 1997)

Figura 3 - Estrutura química da lignina

A pectina é um polissacarídeo complexo, que consiste essencialmente de ácido poligalacturônico (BLEDZKI & GASSAN, 1997). As cadeias de pectina apresentam, algumas vezes, ligações cruzadas por íons de cálcio, o que aumenta a integridade estrutural nas regiões ricas em pectina. As pectinas são importantes para as fibras, principalmente aquelas provenientes da entrecasca. A lignina, a hemicelulose e a pectina, em conjunto, funcionam como matriz e

adesivo, ajudando a manter unida a estrutura formada pela celulose neste compósito fibroso natural (CLEMONS & CAULFIELD, 2005). Esta estrutura está representada na Figura 4.



Fonte: (MADSEN, 2004)

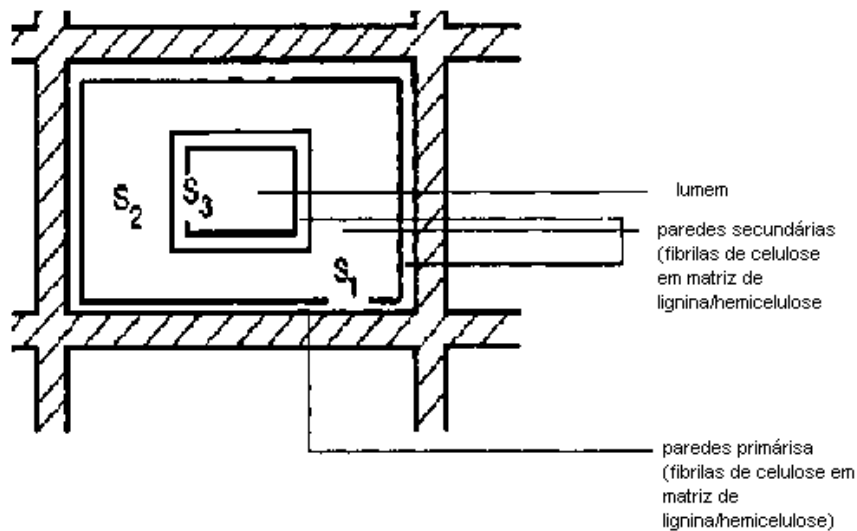
Figura 4 - Estrutura do compósito fibroso natural formado pelos principais constituintes das fibras naturais

Além dos componentes já mencionados, as fibras naturais também apresentam em sua composição química outros componentes em pequenas quantidades, que são as graxas e as cinzas. As graxas apresentam uma baixa massa molecular e podem ser extraídas com soluções orgânicas (BLEDZKI & GASSAN, 1999). As graxas podem afetar certas propriedades das fibras como, por exemplo, cor, odor e favorecer a redução da resistência mecânica. Já uma alta concentração de cinzas, como as presente na casca do arroz, pode afetar a abrasividade natural da fibra (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

4.1.2.2 Estrutura Física das Fibras Naturais

As fibras naturais, como dito anteriormente, são compósitos naturais fibrosos formado por múltiplas camadas. A célula unitária é subdividida em várias camadas concêntricas, sendo uma camada primária e três secundárias. A Figura 5 mostra a esquematização de uma célula unitária da juta. As paredes

primárias e secundárias possuem composição e direção das microfibrilas de celulose diferentes (BLEDZKI & GASSAN, 1997).



Fonte: (BLEDZKI & GASSAN, 1997)

Figura 5 - Esquematização de uma célula unitária de juta

O ângulo das fibrilas e o teor de celulose determinam as propriedades das fibras de origem vegetal (BLEDZKI & GASSAN, 1997). Nas camadas S₁, S₂ e S₃, as fibrilas de celulose são arranjadas em hélices de forma espiralar na direção do eixo longitudinal da fibra com um ângulo constante dentro das camadas, mas com um ângulo maior entre as camadas. O ângulo das fibrilas nas camadas S₁ e S₃ são grandes, indicando que as fibrilas são quase transversalmente orientadas em relação ao eixo da fibra. Por outro lado, a camada S₂ apresenta ângulo menor, por esta razão as fibrilas são orientadas mais paralelamente em relação ao eixo da fibra. Devido a isto e ao fato da camada S₂ ser a mais espessa, ela é preponderante na determinação das propriedades das fibras de origem vegetal.

4.1.2.3 Densidade e Propriedades Mecânicas das Fibras Naturais

Devido às diferentes espécies, variabilidade natural dentro das espécies, e diferenças climáticas e de crescimento, as dimensões das fibras naturais bem como as propriedades químicas e físicas podem ser extremamente variáveis. Devido a isto, métodos de produção de fibras com maior reprodutibilidade nas propriedades estão sendo estudados cada vez mais (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

A maioria das fibras naturais apresenta uma densidade máxima por volta de $1,5 \text{ g/cm}^3$. Entretanto algumas fibras naturais, como a madeira, que são ocas e possuem uma baixa densidade em seu estado natural, precisam ser densificadas durante o processamento. Todavia, até mesmo a máxima densidade de uma fibra natural ainda é bem inferior as das fibras inorgânicas como a fibra de vidro. Devido a esta baixa densidade é que o uso de fibras naturais para reforço em materiais poliméricos torna-se atraente (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

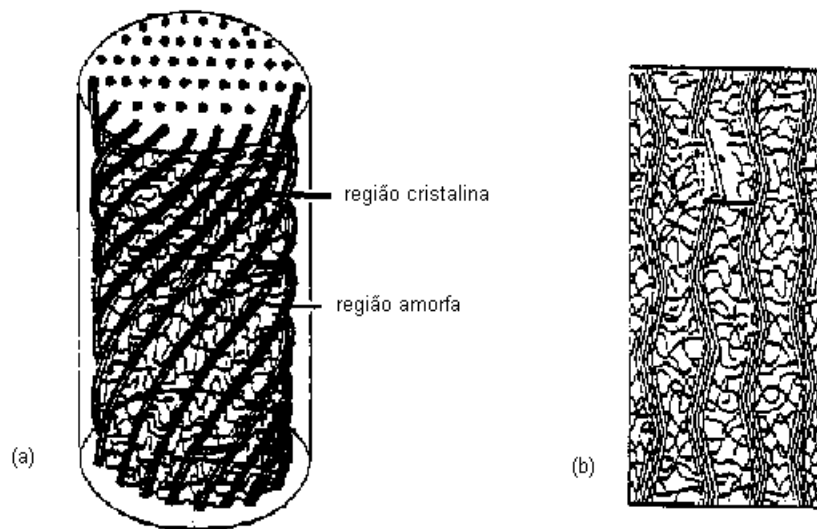
Além da baixa densidade, as fibras naturais apresentam, relativamente, altos valores de resistência mecânica e rigidez (Tabela 3), por isto são utilizadas como reforço para materiais poliméricos. As propriedades mecânicas das fibras naturais são em parte determinadas pela estrutura da fibra (BLEDZKI & GASSAN, 1997). Além dos fatores citados no início desta seção, outro fator que tem fundamental importância nas propriedades mecânicas, principalmente a rigidez, das fibras é o ângulo formado pelas microfibrilas de celulose. O ângulo formado pelas microfibrilas se refere normalmente ao ângulo na camada S_2 (Figura 6). A Tabela 3, também relaciona o ângulo das

microfibrilas, de algumas fibras, da camada S_2 com algumas propriedades mecânicas.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de algumas fibras orgânicas e inorgânicas

Fibras	Ângulo das fibrilas de celulose (°)	Densidade (g/cm ³)	Módulo Elástico (GPa)	Resistência (MPa)	Deformação (%)
Vidro		2,49	70	2700	-
Kevlar		1,44	124	2800	2,5
Nylon-6		1,14	1,8 – 2,3	503 - 690	17 – 45
Polipropileno		0,91	1,6 – 2,4	170 - 325	80 – 100
Poliéster		1,38	1,5 – 2,1	270 - 730	12 – 55
Linho	6-10	1,4 – 1,5	50 - 70	500 - 900	1,5 – 4,0
Cânhamo	6	1,48	30 - 60	300 - 800	2 – 4
Juta	8	1,3 – 1,5	20 - 55	200 - 500	2 - 3
Sisal	10-25	1,5	9 - 22	100 - 800	2,0 – 2,5

Fontes: (CLEMONS & CAULFIELD, 2005), (BLEDZKI & GASSAN, 1997) e (MADSEN, 2004)



Fonte: (BLEDZKI & GASSAN, 1997)

Figura 6 - Representação da camada S_2 : (a) Visão em 3D; (b) Visão em 2D

4.1.3 Absorção de Umidade e Durabilidade

A celulose, o maior constituinte químico das fibras naturais contém hidroxilas e outros grupos que possuem oxigênio em sua estrutura e que absorvem umidade através de ligações com o hidrogênio. A umidade presente nas fibras pode variar enormemente dependendo do tipo de fibra. O processamento dessas fibras também tem um efeito muito grande na sorção de umidade. A Tabela 4 mostra o quão grande é a variação de umidade presente nas fibras quando estas são submetidas a diferentes umidades relativas (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

Tabela 4 - Quantidade de umidade presente em algumas fibras naturais a 27°C

Fibras	Quantidade de umidade		
	30% de umidade relativa	65% de umidade relativa	90% de umidade relativa
Bambu	4,5	8,9	14,7
Bagaço	4,4	8,8	15,8
Juta	4,6	9,9	16,3

Fonte: (CLEMONS & CAULFIELD, 2005)

A higroscopicidade destas fibras pode demandar alterações tanto no processo de fabricação dos compósitos como no desempenho do produto final. Devido a isto, deve-se utilizar processamentos que sejam menos sensíveis a umidade ou fazer uma secagem das fibras antes ou durante o processo de confecção do compósito. As fibras naturais absorvem menos umidade quando estão ao menos encobertas parcialmente pela matriz polimérica. Contudo, uma pequena quantidade de umidade absorvida pode afetar o comportamento do compósito. A umidade pode criar um filme sobre a fibra diminuindo a interação desta com a matriz, enfraquecendo a interface fibra/matriz. Além disso, as fibras aumentam de volume com a sorção de umidade o que pode gerar esforços compressivos no compósito e prejudicar a matriz. Os métodos

utilizados para diminuir a sorção de umidade incluem a adequada dispersão e encapsulamento das fibras na matriz durante a etapa de mistura, limitação do teor máximo de fibra, modificação química da fibra, ou simplesmente minimizar à exposição do compósito a umidade (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

As fibras naturais sofrem degradação fotoquímica quando submetidas à radiação ultravioleta (UV). Elas são degradadas biologicamente, pois microorganismos atacam as paredes das células das fibras. Esta degradabilidade pode ser uma desvantagem em aplicações duráveis ou quando os compósitos são utilizados em condições ambientais severas. Por outro lado, a fácil degradação destas fibras é uma vantagem quando isto é desejável, como é o caso da decomposição de produtos descartados.

Devido à sua baixa estabilidade térmica, as fibras naturais são geralmente associadas a plásticos que possuem baixas temperaturas de processamento (geralmente inferiores a 200°C). Acima desta temperatura alguns componentes das fibras naturais se decompõem. Dos componentes que formam as fibras naturais a celulose é o que apresenta a maior estabilidade térmica (CLEMONS & CAULFIELD, 2005), e por isto, a celulose purificada quimicamente pode ser utilizada em temperaturas superiores a 200 °C (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

A liberação de gases voláteis pode, antes, durante e depois do processamento, gerar odores, principalmente em aplicações onde os compósitos são usados em ambientes fechados e especialmente quando há presença de umidade. Este é um dos motivos para algumas restrições quanto

ao uso deste tipo de compósito em muitas aplicações na indústria automobilística (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

4.1.4 Meio Ambiente/Toxicidade

Os benefícios ambientais das fibras naturais e das fibras de madeira tem sido de grande influência para o seu uso, particularmente na Europa. As fibras naturais vêm de fontes renováveis, não necessitam de uma grande quantidade de energia para serem processadas, e ainda são biodegradáveis.

De uma maneira abrangente, as fibras naturais não são materiais perigosos. Entretanto, como possuem baixa estabilidade térmica, podem durante o processamento liberar gases ou até mesmo entrar em combustão. Devido a isto algumas precauções, como o bom controle da temperatura de processamento, ter um ambiente bem ventilado e o uso de equipamentos de proteção, dentre outras, necessitam ser adotadas.

4.2 Propriedades Mecânicas dos Compósitos com Fibras de Origem Vegetal

O comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibras naturais é muito dependente de fatores como: tipo, tratamento, teor e orientação da fibra, tipo da matriz, aditivos e métodos de processamento. As fibras naturais são adicionadas aos plásticos para melhorar suas propriedades mecânicas. Dentre as propriedades de compósitos poliméricos que são mais influenciadas estão a rigidez e a resistência mecânica. Esta melhoria nas propriedades ocorre sem que haja um aumento muito grande na densidade (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

As fibras naturais são hidrofílicas por isto não são compatíveis com os termoplásticos *commodities*. Agentes de acoplamentos, como as poliolefinas maleitizadas, os silanos, e os isocianatos, são usualmente utilizados para melhorar a interação fibra/matriz (CLEMONS & CAULFIELD, 2005).

A Tabela 5 apresenta resultados típicos de propriedades tênses de compósitos reforçados por fibras naturais de origem vegetal. Os resultados revelam que compósitos com fibras dispostas aleatoriamente possuem propriedades tênses moderadas com módulo elástico em torno de 6 GPa e tensão de ruptura abaixo de 60 MPa. Além disso, somente a tensão de ruptura sofre um acréscimo significativo quando se utiliza algum tipo de tratamento de compatibilização, mas o efeito é relativamente pequeno. Deve-se mencionar que os efeitos da compatibilização são mais pronunciados na flexão ou dobramento. Na Tabela 5 também é mostrado, como é de se esperar, que as propriedades tênses aumentam significativamente, e uma maior fração volumétrica de fibra é obtida quando as fibras são alinhadas. Esta última evidência é notável em termos ecológicos, já que boas propriedades mecânicas e uma maior quantidade de fibra podem ser obtidas sem a necessidade de aditivos químicos (MADSEN, 2004).

Tabela 5 - Propriedades tênses de alguns compósitos reforçados com fibras vegetais alinhadas e aleatórias

Fibra	Orientação das fibras	Fração volumétrica	Módulo Elástico (GPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Matriz
Cânhamo	aleatórias	0,40	2,7	33	Epóxi
	alinhadas	0,40*	2,4	37	
Linho	aleatórias	0,14	3,4	36	Polipropileno
	alinhadas	0,14*	3,4	39	
Juta	aleatórias	0,30	5,2	40	membrana poliolefínica
	alinhadas	0,30*	5,2	61	
Madeira	aleatórias	0,50	27,2	225	Poliéster
	alinhadas	0,50	27,2	225	
Vidro	aleatórias	0,27	42	28	Polipropileno
	alinhadas	0,27*	42	52	
Vidro	aleatórias	0,20	5,4	77	Polipropileno
	alinhadas	0,20	5,4	77	
Vidro	aleatórias	0,60	45,0	1020	Polipropileno
	alinhadas	0,60	45,0	1020	

Fonte: (MADSEN, 2004)

*Fibras com tratamento químico com anidrido maleico

Verifica-se na Tabela 5 que os compósitos com fibra de vidro apresentam propriedades superiores aos dos compósitos com fibras vegetais, independente da orientação das fibras. Isto porque as fibras de vidro apresentam propriedades superiores às fibras vegetais além de apresentar uma compatibilidade maior com as matrizes. No entanto, percebe-se que os compósitos com fibras naturais, apresentam um módulo elástico aceitável enquanto deixam desejar em relação resistência à tração (MADSEN, 2004)

4.3 Métodos de Produção de Compósitos com Fibras de Origem Vegetal

4.3.1 Compósitos com Matriz Termofixa

As técnicas utilizadas para a produção de compósitos com fibras naturais de origem vegetal são praticamente as mesmas utilizadas para a

produção de compósitos com fibras sintéticas, principalmente quando se utiliza matriz termofixa. Os processos mais comumente empregados para a produção de compósitos com este tipo de matriz e fibras naturais são: *hand lay-up*, pultrusão, moldagem por compressão, além do *Sheet Molding Compound* (SMC) e do *Bulk Molding Compound* (BMC), estes processos são descritos em anexo.

Deve-se ressaltar que, devido às especificidades das fibras naturais, algumas modificações nos processos são necessárias, como por exemplo, uma secagem prévia das fibras para evitar a sorção de umidade e/ou a saída da umidade durante o processamento o que pode provocar a criação de vazios. Adotados estes procedimentos um compósito com melhores propriedades mecânicas é gerado. Um exemplo são os compósitos juta/epóxi, em que as fibras com 1% de umidade, apresentam uma resistência à tração 10% e o módulo elástico 20% superiores aos de compósitos análogos tendo fibras com 10% de umidade (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

4.3.2 Compósitos com Matriz Termoplástica

Os compósitos com fibras naturais de origem vegetal e matriz termoplástica são o foco deste trabalho. Portanto maior ênfase será dada à estes tipos de compósitos e seus respectivos processamentos.

Os processamentos aqui detalhados serão classificados de acordo com o tamanho e a forma do reforço.

Processamentos com fibras curtas

Injeção

É o processo mais comumente utilizado para se produzir compósitos com fibras naturais. Entretanto, devido à baixa densidade das fibras e a natural incompatibilidade destas com as poliolefinas, necessita-se de uma etapa de mistura com agentes de acoplamento e/ou densificação (mistura com a matriz polimérica). Esta mistura prévia pode ser feita por solução, onde a matriz polimérica é dissolvida, por ação de um solvente (por exemplo, o polietileno é dissolvido pelo tolueno), e a esta solução são adicionadas fibras curtas. Em seguida, o solvente é retirado e a mistura (fibra+matriz) é triturada e injetada (JOSEPH, *et al.*, 1996; PAUL, *et al.*, 1997; GEORGE, *et al.*, 1998; KALAPRASAD, *et al.*, 2000). Outra forma de se adicionar as fibras e agentes de acoplamento, antes da injeção é através de uma mistura a quente realizada em misturadores internos tipo *bambury* ou *mixer* (ARBELAIZ, *et al.*, 2006; BOS, *et al.*, 2006). Estes misturadores também são utilizados para misturar a matriz com o agente de acoplamento sendo as fibras incorporadas na etapa de extrusão (KUAN, *et al.*, 2006). A incorporação das fibras e do agente de acoplamento à matriz também pode ser realizado em uma única etapa durante o processo de extrusão (KEENER, *et al.*, 2004). A extrusora também é utilizada em um processo misto de pultrusão. Neste caso, a matriz polimérica é processada pela extrusora que despeja o material fundido em um molde por onde passa a fibra em um movimento contínuo. Este fio (fibra e matriz) é então, resfriado e triturado, para depois ser injetado (BOS, *et al.*, 2006; GANSTER, *et al.*, 2006).

Extrusão

No processo de extrusão também se utiliza uma mistura prévia dos componentes dos compósitos (fibra, matriz, agentes compatibilizantes, aditivos, etc.), normalmente a quente. Este material é então colocado na extrusora, normalmente, com duas roscas, podendo ou não ser co-rotacionais e o produto geralmente apresenta uma geometria simples (WANG, *et al.*, 2005). Neste processo também ocorre quebra da fibra.

Compressão a quente

É um dos processos mais simples utilizados para a produção de compósitos com fibras naturais. Consiste em se comprimir, a quente, em um molde metálico, a mistura prévia formado pela matriz, pelas fibras e, em alguns casos, o agente de acoplamento (LEI, *et al.*, 2007; MOHANTY, *et al.*, 2006; KIM, *et al.*, 2006; HERRERA-FRANCO & VALADEZ-GONZÁLEZ, 2005; JAYARAMAN & BHATTACHARYYA, 2004; VALADEZ-GONZALEZ, *et al.*, 1999). Tal como, na extrusão e na injeção, o processo de mistura mais utilizado emprega misturadores internos. Pode-se utilizar também uma mistura mecânica (com um moinho de café, por exemplo), onde se coloca as fibras, o polímero e o agente de acoplamento. O produto obtido é então comprimido (LUYT & MALUNKA, 2005).

Rotomoldagem

Resumidamente, neste processo se utiliza um molde metálico, cilíndrico, bi-partido, onde são colocados o polímero (que pode ser em pó) e as fibras naturais. O molde é então rotacionado em dois eixos a velocidades relativamente baixas, enquanto é aquecido, até que o compósito seja

consolidado. O molde é posteriormente, resfriado e a peça retirada (TORRES & ARAGON, 2006).

Calandragem

O processo de calandragem consiste em se passar por entre dois rolos, aquecidos, a matriz polimérica e as fibras. A matriz se funde, e com as várias passagens pelos rolos, ocorre a mistura e a dispersão das fibras na matriz. Este processo pode ser utilizado somente como etapa de mistura, necessitando de posterior moldagem (LÓPEZ-MACHADO & ARROYO, 2000), ou podem ser produzidos produtos planos de espessura controlada pela distância entre os rolos (LI & HE, 2004).

Processamento com fibras na forma de mantas e tecidos

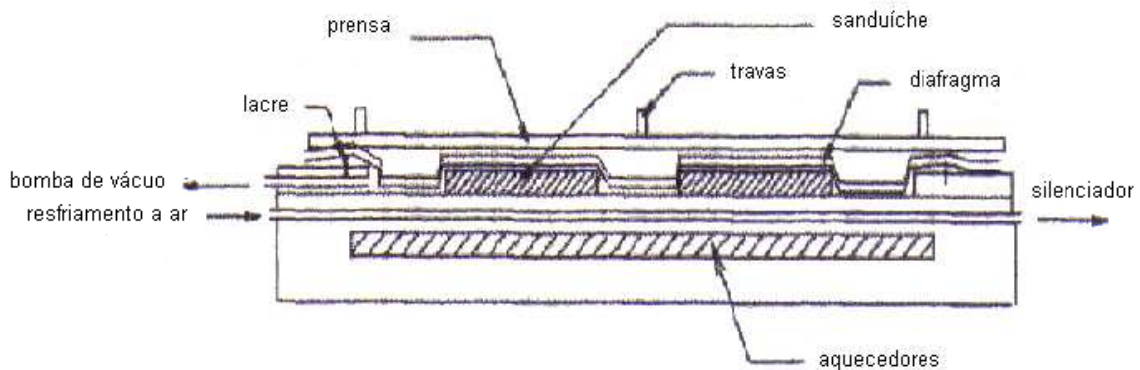
Compressão a quente

Devido à estrutura das fibras, um dos únicos processos que permite a utilização de reforços na forma de mantas ou tecido é a compressão a quente. Dentre as técnicas utilizadas neste processo está o *film stacking* que se caracteriza pelo empilhamento de camadas de fibra (manta ou tecido) intercaladas por material polimérico, seguido de compressão (WAMBUA, *et al.*, 2007; SINGLETON, *et al.*, 2003; JAYARAMAN, 2003; ZAMPALONI, *et al.*, 2007).

Moldagem por Vácuo (vacuum forming)

Neste processo ocorre a consolidação de lâminas de compósitos. Camadas de polímeros são intercaladas por mantas de fibra, dentro de uma câmara onde é aplicado vácuo e calor, com posterior resfriamento por meio de

ar comprimido. Neste processo tem-se um controle muito grande da espessura das lâminas do compósito (JAYARAMAN, 2003). O processo é ilustrado na Figura 7.



Fonte: (JAYARAMAN, 2003)

Figura 7 - Esquema da moldagem por vácuo

“Express”-Processing

Neste processo as mantas de fibras naturais são intercaladas com finas camadas de plástico fundido, proveniente de uma extrusora móvel, tudo isto dentro de um molde metálico. Este processo foi desenvolvido pela Daimler Benz, de Ulm na Alemanha, e foi otimizado para que uma única passagem da extrusora seja suficiente para impregnar todas as fibras. A composição básica do compósito formado é de duas camadas de fibra (uma por cima e outra por baixo) e com uma camada de plástico entre estas duas camadas (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

Processamento com fibras longas e alinhadas

Existem algumas técnicas utilizadas para dispor as fibras de forma alinhada em um compósito com matriz termoplástica. Em todas, com exceção da pultrusão, o produto final é obtido através de uma compressão a quente.

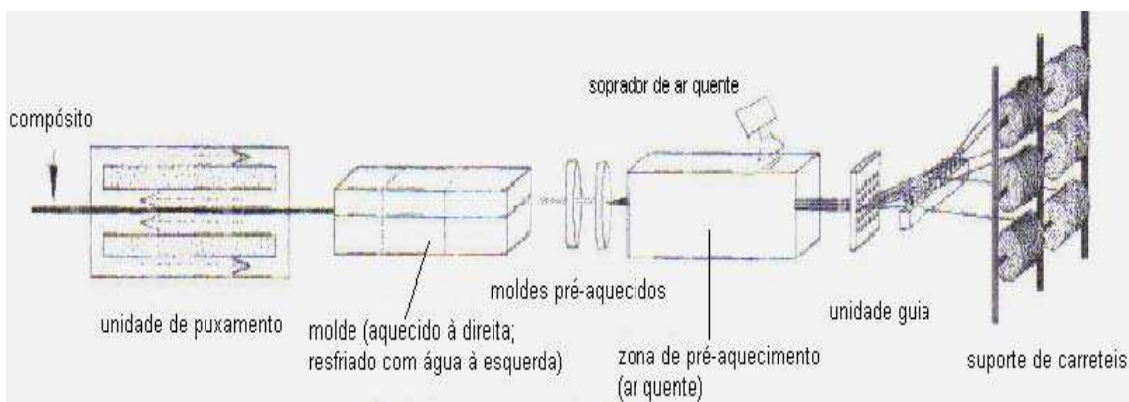
Compressão a quente

Este é o processo mais simples, e talvez, o mais trabalhoso. Nele, em um molde metálico especialmente desenvolvido, as fibras longas são dispostas cuidadosamente para se obter o alinhamento desejado por sobre o material polimérico (com grânulos de pequenas dimensões). O conjunto é então aquecido e comprimido até formar o laminado (HERRERA-FRANCO & VALADEZ-GONZÁLEZ, 2004). Em outro processo, as fibras são dispostas entre dois filmes poliméricos, alinhadas e coladas ao molde. Em seguida aplica-se pressão e calor (BRAHMAKUMAR, *et al.*, 2005).

Pultrusão

O processo de pultrusão para fibras naturais é similar aquele utilizado para fibras sintéticas, mas com algumas modificações, podendo-se citar: a necessidade de pré-aquecimento das fibras para melhorar a impregnação dos fios da fibra; a necessidade de uma unidade de resfriamento, que não é necessário na pultrusão com matriz termofixa. A esquematização do processo de pultrusão é mostrado na Figura 8. As fibras, provenientes de carretéis são pré-aquecidas com ar quente antes de entrar no molde, onde, em seguida, entra em contato com a matriz polimérica. O conjunto de fios e matriz polimérica é puxado e aquecido até a consolidação final do compósito. Este

processo também pode ser feito com fios misturados com a matriz polimérica (*commingled yarn*) (van de VELDE & KIEKENS, 2001).

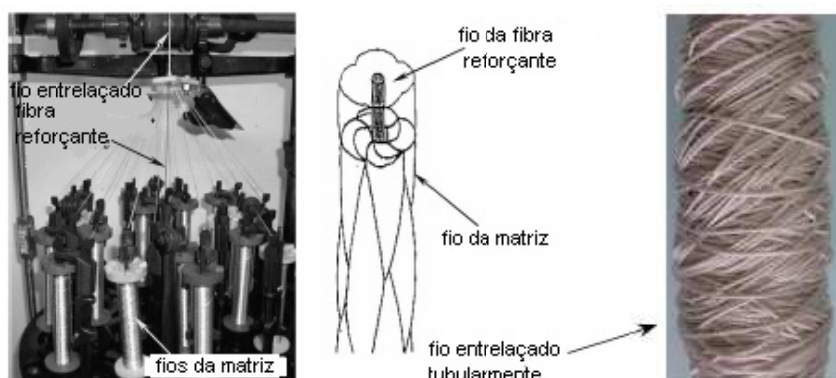


Fonte: (van de VELDE & KIEKENS, 2001)

Figura 8 - Esquema do processo de pultrusão

Entrelaçamento Tubular

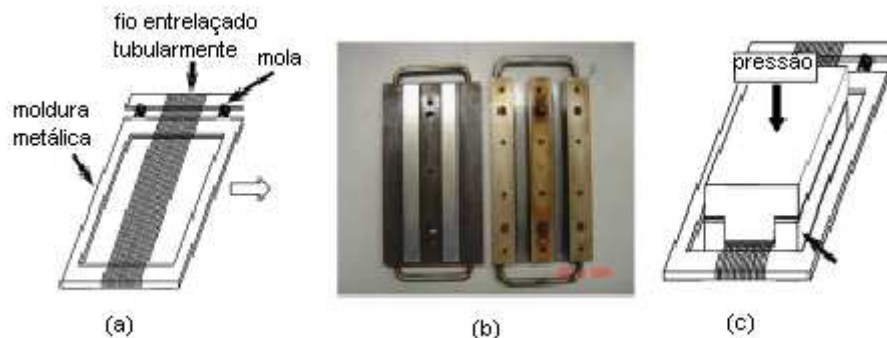
Neste processo, desenvolvido recentemente (KHONDKER, *et al.*, 2006), uma máquina tubular de entrelaçar fios é utilizada para produzir um fio, com alma de fibra natural e exteriormente recoberta por fios da matriz de acordo com a Figura 9.



Fonte: (KHONDKER, *et al.*, 2006)

Figura 9 - Processo de fabricação de fios contínuos de juta recoberta com fios de polipropileno

Após a confecção do fio, os mesmos são colocados de forma alinhada no molde e submetidos a uma compressão a quente. Gerando, assim, um compósito com fibra com um alto grau de alinhamento, bem como, uma degradação mínima das fibras quando se compara com os processos anteriores (Figura 10).



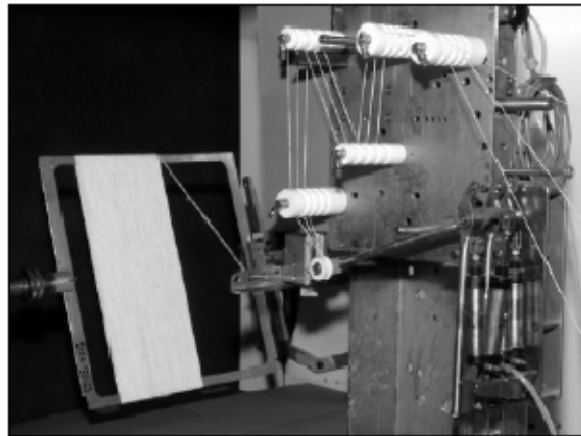
Fonte: (KHONDKER, *et al.*, 2006)

Figura 10 - Passos do processo de compressão: (a) alinhamento dos fios sob tensão em um quadro vazado, (b) molde e (c) consolidação

Filament winding e Commingled filament winding

Neste processo fios da fibra natural (linho e cânhamo) são enrolados em uma moldura metálica (Figura 11), e entre eles são colocados filmes de material termoplástico. O sanduíche é então comprimido a quente formando um compósito com um alto grau de alinhamento das fibras, este processo é chamado de *filament winding* (MADSEN, 2004). A mesma estrutura de produção da Figura 11 é utilizada para produzir compósitos com o *commingled yarn*. Neste caso não se faz necessário a colocação dos filmes poliméricos, pois os fios utilizados já são confeccionados com a matriz polimérica e com a fibra reforçante. Da mesma forma que o processo anteriormente citado, este

necessita de uma compressão a quente para se conformar o compósito (MADSEN, 2004).



Fonte: (MADSEN, 2004)

Figura 11 - Processo *filament winding* com fibras naturais

4.4 Aplicação dos compósitos com fibras naturais

Na Europa, os compósitos com fibras de origem vegetal são principalmente usados na indústria automobilística. As fibras são utilizadas em sua forma bruta ou como mantas (não tecidas). Por consequência, os compósitos apresentam propriedades mecânicas moderadas. Isto faz com que eles sejam utilizados em produtos não-estruturais. Além disto, a grande sensibilidade das fibras naturais à umidade faz com que estes compósitos sejam utilizados em partes internas dos automóveis, como por exemplo, em forros de portas. Mais recentemente estes compósitos foram utilizados também em componentes externos em um automóvel da Mercedes-Benz, com objetivo de cobrir o motor e a transmissão. Em 2002, o consumo de compósitos na indústria automobilística foi de 17000 toneladas e o consumo médio de fibra por carro é de 10 – 15 kg (MADSEN, 2004).

No restante do mundo ocidental, o uso de compósitos não estruturais feitos a partir de fibras vegetais é consideravelmente mais difundido, sendo a fibra de madeira a mais utilizada. Nos Estados Unidos, as fibras de madeira respondem por 7% do total de cargas e fibras utilizadas em materiais compósitos, e o mercado está crescendo muito rapidamente. As principais aplicações são para a construção civil, como coberturas, perfis de janelas e assoalhos. Além disto, estes compósitos também estão sendo utilizados em produtos como vasos para plantas e em acessórios para escritórios (MADSEN, 2004).

Em todas estas aplicações, o efeito reforçante não tem grande importância. As fibras não são alinhadas e as boas propriedades tênsis das fibras não são utilizadas de forma eficiente. Apenas na Índia, casas, silos e barcos de pesca são fabricados com fibras de juta alinhadas (MOHANTY & MISRA, 1995).

O uso industrial dos compósitos com fibras vegetais gera uma redução nos custos do produto final, além de proporcionar ganhos ambientais importantes. A União Européia, por exemplo, determinou que até 2006, 85% (em peso) dos componentes de um automóvel tem que ser recicláveis e este valor subirá para 95% em 2015. Em relação aos compósitos com fibras vegetais o termo 'reciclabilidade' ainda não está muito bem resolvido. Para estes materiais a reciclagem ou a reutilização dos compósitos é um campo com pouca experiência prática acumulada, quando comparado a outros materiais como metais e plásticos puros. Compósitos com fibras de vidro e matriz termoplástica podem ser recicladas pela remoldagem de peças usadas, mas no caso dos compósitos com fibras vegetais, o reprocessamento provoca uma

degradação severa nas fibras devido a repetida exposição térmica, provocando, assim, uma diminuição drástica nas propriedades mecânicas. Embora as aplicações industriais dos compósitos com fibras vegetais não estejam intimamente ligadas à reciclabilidade, elas servem de base para um aumento futuro no uso de materiais ecologicamente amigáveis (MADSEN, 2004).

CAPÍTULO V

5.1 Compósitos com fibra de juta

A juta é uma das fibras mais utilizadas como reforço em materiais poliméricos. Ela apresenta um bom conjunto de propriedades mecânicas, disponibilidade e baixo custo, podendo, portanto, ser uma boa substituta para as fibras sintéticas em muitas situações (BATISTA, 1995).

Como a utilização das fibras de juta como reforço em matrizes termoplásticas não é tão extensa quanto como em matrizes termofixas, e como este é o tema de nosso trabalho, neste capítulo será dada ênfase à fibra de juta e aos compósitos com ela produzidos, utilizando matrizes poliolefínicas.

5.1.1 Fibra de juta

A juta é a segunda fibra vegetal mais consumida no mundo, perdendo apenas para o algodão, sendo empregada principalmente na fabricação de cordas, sacaria, esteiras e produtos afins. Ela é obtida da haste da planta *Corchorus Capsularis*, cultivadas em áreas de inundação ou *Corchorus Olitorius* cultivadas em áreas altas (D'ALMEIDA, 1987; MORASSI, 1995).

A juta foi introduzida no Brasil por Riyota Oyama. A cultura foi feita inicialmente por japoneses, tornando-se posteriormente 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 (Companhia Têxtil Castanhal).

Dos dois tipos existentes, a mais cultivada no Brasil, e a utilizada neste trabalho, é a juta *Corchorus Capsularis* que é uma fibra têxtil que provem de uma árvore da família das "tiliáceas". Esta árvore alcança uma altura de 3 a 4 metros e o seu talo tem um diâmetro de aproximadamente 20 mm, crescendo em climas úmidos e tropicais. A época de semear varia, segundo a natureza e o clima. As plantas florescem 4 a 5 meses depois de semeadas (Figura 12a) e inicia-se imediatamente a colheita. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno. A extração das fibras é feita pelo processo da maceração. As árvores cortadas rente ao solo por meio de foices são limpas das folhas e postas em feixes dentro da água corrente ou parada. A alta temperatura das regiões nas quais é cultivada favorece a fermentação e desta forma se consegue a maceração em 8 a 10 dias. Retira-se assim facilmente a casca da planta e elimina-se da fibra a parte lenhosa do talo seguido pelo enxágua e empacotamento (Figura 12b). As melhores qualidades de juta distinguem-se pelo seu bom comprimento, pela robustez das fibras e pela cor branca e brilhante do talo. As qualidades inferiores distinguem-se pela cor dos talos, que são mais escuros, pelo menor comprimento das fibras, de cor amarelo acinzentado, ou por terem menor resistência mecânica. O comprimento das células elementares da juta é em média de 0,80mm, e o diâmetro varia de 10 a 30 μm (Companhia Têxtil Castanhal).



(a)



(b)

Fonte: (Companhia Têxtil Castanhal)

Figura 12 - (a) Plantas de juta prontas para a colheita; (b) fardos de fibras de juta após a colheita

A fibra de juta utilizada neste trabalho apresenta a seguinte composição química (Tabela 6) (Companhia Têxtil Castanhal):

Tabela 6 - Composição química da fibra de juta

Componentes (%)					
Celulose	Hemi-Celulose	Lignina	Pectina	Água/Solúveis	Gorduras e Graxas
65,2	22,2	10,8	-	1,5	0,3

Fonte: (Companhia Têxtil Castanhal)

Dada a proporção centesimal das substâncias orgânicas da juta, tem-se: carbono com 46,3%, oxigênio com 47,6% e hidrogênio com 6,1%.

Estes dados permitem afirmar que o principal componente da juta é a celulose, sob a forma de ligno-celulose.

A juta tem boa afinidade para com corantes diretos e corantes básicos. É muito higroscópica, com umidade variando em torno 12%, o que a torna a

matéria prima ideal para a sacaria, evitando tanto o ressecamento quanto a fermentação do produto acondicionado (Companhia Têxtil Castanhal).

Outras propriedades das fibras de juta estão listadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características e propriedades da fibra de juta

Densidade	1,3 g/cm ³
Higroscopicidade	Muito alta até 35% do peso seco. Em clima normal, a fibra absorve 12,5 a 14,0% de umidade.
Comportamento com ácidos e lixívias	Muito sensível a ácidos. Lixívias não prejudicam.
Cor	Em geral varia de cinza a marrom avermelhado.
Superfície da Fibra	Lisa.
Teste de combustão	Arde como outras fibras vegetais

Fonte: (Companhia Têxtil Castanhal)

A resistência à tração das fibras de juta varia em faixa muito ampla. Valores médios na faixa de 240 a 550 MPa são reportados. O módulo de elasticidade destas fibras varia na faixa de 17,4 a 32,0 GPa (TOLEDO FILHO, 1993). A dispersão destas propriedades está relacionada a fatores, tais como: variedade, época do plantio, solo, colheita, incidência solar, idade e parte da planta de onde a fibra foi extraída, dentre outros.

A fibra de juta é relativamente inextensível e quando testada em comprimento curto (10 mm), estende-se aproximadamente 2,6% antes da ruptura. O diagrama carga-deslocamento é linear, e a extensão da fibra é largamente proveniente das moléculas da celulose, o seu principal constituinte (COSTA, 1997).

3.1.2 Compósitos com matrizes termoplásticas (polietileno e polipropileno)

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos sobre compósitos de matriz termoplástica/ fibra de juta, dando-se ênfase ao processamento utilizado e ao comportamento mecânico.

GASSAN & BLEDZKI, 1997, estudaram a influência do tratamento da fibra de juta, com um copolímero enxertado (*graft copolymer*) de polipropileno e anidrido maleico (MAPP), nas propriedades mecânicas dos compósitos PP/fibras de juta. As fibras ficaram 24h em álcool para a retirada das graxas, sendo em seguida lavadas com água destilada. O tratamento com MAPP, foi feito na presença de uma solução de tolueno e a 100°C, durante 5 e 10 minutos. Por fim as fibras foram secas a vácuo por 2h a 75°C. As fibras tratadas e não-tratadas, na forma de mantas, foram adicionadas ao PP por *film stacking* (camadas empilhadas de filme de PP, fibras de juta e filmes de PP), seguido de aquecimento e pressão. Os resultados demonstraram que todas as propriedades estudadas melhoraram com o tratamento. Os autores atribuíram estes bons resultados à melhora na interface fibra-matriz.

MOHANTY, *et al.*, 2000, também estudaram o efeito da modificação das fibras de juta. Para tanto utilizaram dois tipos de tecidos tramados feitos de juta (*hessian cloth*) e um outro na forma de carpete (manta), e a fibra passou por diferentes tratamentos: alcalino (com NaOH), com anidrido maleico graftizado, com metilmetacrilato graftizado, cianoetilato, além da lavagem com detergente e com uma mistura de álcool com benzeno. Para a incorporação das fibras ao biopolímero – poly(3-oxibutirato-co-8%-3-hidroxivalerato) – foi utilizada a

técnica do empilhamento de filmes, onde duas camadas de tecido foram colocadas entre dois filmes de biopolímero, seguindo-se aquecimento e compressão. Dentre os tratamentos utilizados o tratamento com NaOH, foi o que levou a compósitos com melhores propriedades mecânicas (resistência à tração, ao dobramento e ao impacto). No que se refere ao tipo de tecido, os compósitos reforçados com o tecido tramado (*hessian cloth*) apresentaram melhores resultados do que os reforçados com a manta. O teor ótimo de fibra para esta configuração se situou na faixa de 20-25%, em volume. As melhoras nas propriedades mecânicas foram associadas a uma melhora na interface fibra-matriz.

RANA, *et al.*, 2003, verificaram o efeito de um compatibilizante (anidrido maleico grafizado com polipropileno), de dois modificadores de impacto com diferentes índices de fluidez (3 e 120 g/10min), um de origem poliolefínica e outro elastomérico, nas propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com fibras curtas de juta (com teor variando de 30 a 50%, em peso). A incorporação dos componentes foi feita através de um misturador interno e em seguida foi utilizado uma injetora para a moldagem dos corpos de prova. Os resultados demonstraram que as propriedades mecânicas dos compósitos melhoram com a adição de compatibilizante, principalmente para um teor de 1%. Quanto ao efeito dos modificadores de impacto, houve uma melhora significativa na resistência ao impacto, para corpos de prova entalhados e não-entalhados, com o aumento no teor deste aditivo. Entretanto as resistências e módulos elásticos em tração e flexão, diminuíram. Em relação ao teor de fibra, houve um aumento nas propriedades analisadas com o aumento do teor de fibra, sendo que este foi mais significativo quando passou-se de 30 para 40%.

PLACKETT, *et al.*, 2003, produziram um compósito biodegradável utilizando como matriz o biopolímero L-polilactídeo (PLA) e, como reforço, mantas de juta. O sistema de produção utilizado foi o *film stacking*, sendo este dividido em quatro passos: 1) pré-compressão; 2) aquecimento e aplicação de vácuo; 3) transferência para uma prensa para haver a consolidação e o resfriamento; e, 4) remoção do compósito da prensa. Neste processo foi utilizado um molde metálico com revestimento de Teflon e diferentes temperaturas de processamento (180 – 220 °C). Os compósitos apresentaram um teor de 40%, em peso, de fibra. Os resultados mostraram que as propriedades tênsis dos compósitos produzidos foram significativamente superiores às da matriz, e melhores ainda para aqueles processados a 210 e 220°C. Por outro lado os compósitos apresentaram uma fratura frágil, o que pode ter sido ocasionado pela presença de bolhas entre as fibras e a matriz. Quanto à resistência ao impacto (utilizando corpos de prova não-entalhados) o comportamento do PLA não foi alterado com a incorporação das fibras de juta, o que segundo os autores é um avanço, já que, normalmente, a utilização de agro-fibras tendem a diminuir esta propriedade. Por fim, os autores observaram que há uma pequena degradação do PLA durante o passo 2 devido à saída de ar e água.

DIEU *et al.*, 2004, pesquisaram a influência da adição de MAPP (copolímero graftizado de polipropileno e anidrido maleico) e de tratamento alcalino com NaOH (variando-se o tempo de tratamento de 10 a 50h) nas propriedades mecânicas de compósitos PP/tecidos de juta. Neste estudo também foram produzidos e avaliados mecanicamente compósitos híbridos de PP reforçados por fibras de vidro e juta. Para produção dos compósitos foi

utilizada a técnica de *film stacking*, utilizando-se o empilhamento de filmes de PP e tecidos tramados de juta, seguido de aquecimento. Para a produção dos compósitos híbridos foi utilizado o mesmo processo mas, alternando-se uma camada de juta e uma camada de manta de fibra de vidro. Os resultados demonstraram que o tratamento do tecido de juta com hidróxido de sódio a 0,4% durante 20h melhora significativamente a adesão entre fibra/matriz. A utilização do MAPP além de melhorar a adesão entre fibra/matriz, fez com que o teor ótimo de fibra fosse elevado em relação as fibras não tratadas, passando de 45% em peso para as fibras não tratadas para 50% com as fibras tratadas. Além disto, devido à melhoria na interface, propriedades como a resistência à tração e a flexão aumentaram significativamente. A resistência ao impacto, porém, se manteve inalterada. Compósitos híbridos (PP – manta fibra de vidro – tecido de juta – manta de fibra de vidro – PP), apresentaram propriedades superiores aos compósitos reforçados somente por juta e, neste caso, houve um aumento da resistência ao impacto.

MOHANTY, *et al.*, 2004, utilizaram o MAPP como agente de acoplamento para compósitos de polipropileno reforçado por fibras curtas de juta, variando parâmetros como comprimento de fibra, concentração de MAPP, tempo de tratamento e teor de fibra. Antes de serem incorporadas ao polipropileno, as fibras passaram por uma lavagem com uma solução de água destilada e detergente (2%), a 70 °C, durante uma hora. Posteriormente foram secas em estufa à vácuo a 70°C. As fibras foram cortadas, em diversos comprimentos, e incorporadas ao polipropileno através de um misturador interno. Em seguida o material obtido foi triturado e conformado em uma prensa com aquecimento. Os valores de resistência à tração, flexão e impacto,

aumentaram com o aumento do teor de fibra, sendo que o valor ótimo foi obtido para 30% em peso. A incorporação de 0,5% de agente de acoplamento (MAPP) aumentou em cerca de 30% a resistência à tração, 72,3% a resistência à flexão e em 24,2% a resistência ao impacto. Acima deste valor (1%) o MAPP age como plastificante, reduzindo os valores das propriedades mecânicas. Dos comprimentos de fibras estudados (3, 6 e 10 mm), os de 6 mm foram os que apresentaram melhores resultados. Foi reportado que o tratamento das fibras com MAPP provoca redução de 61% na absorção de água em relação as fibras não tratadas, além de aumentar a temperatura de fusão de 150,0 para 157,0 °C, o que foi atribuído ao melhoramento da interface fibra/matriz. Por fim, foi observado que há um aumento da viscosidade do sistema (diminuição do MFI) com o teor de fibra, fato este mais pronunciado para as fibras tratadas.

KUMAR, *et al.*, 2005, estudaram a degradabilidade de compósitos preparados com o copolímero etileno-propileno (EP) e fibras de juta. As fibras, com 6mm de comprimento, passaram por tratamento com hidróxido de sódio a 3 e 17,5%. A incorporação da fibras ao EP foi feita através de um misturador interno, seguido de trituração e compressão em uma prensa hidráulica com aquecimento. Dificuldades experimentais limitaram o teor máximo de fibra em 40%. Para efeito de comparação, foram preparados compósitos com celulose microcristalina, vendida comercialmente. Foi observado que os compósitos tratados com o menor teor de NaOH, não só apresentaram melhores propriedades mecânicas e estabilidade térmica, como exibiram menor foto-resistência e bioacessibilidade/bio-desintegrabilidade. Segundo os autores estas alterações podem estar ligadas a presença de ligações cruzadas entre as cadeias de celulose feitas pela lignina. Compósitos contendo fibras tratadas

com uma maior concentração de NaOH, apresentaram uma maior foto-resistência e bioacessibilidade, e piores propriedades mecânicas do que o primeiro, enquanto os compósitos produzidos com a celulose microcristalina apresentaram melhores propriedades mecânicas, devido a melhor dispersão, e a pior estabilidade térmica em relação aos compósitos estudados.

KHAN, *et al.*, 2005, verificaram a influência da adição de 2-hidroxietil metacrilato (HEMA) nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos juta/policarbonato. Neste estudo foram utilizados tecidos de juta, que foram imersos em uma solução metanol contendo 3% de HEMA e 1% de peróxido dicumila por 5min, e secos a temperatura ambiente. Como matriz foram utilizadas folhas de policarbonato. O processo utilizado foi o *film stacking*, onde três camadas de juta foram colocadas entre quatro camadas de policarbonato, submetidas a 5 ton, a 200 °C, durante 5 min. O teor de fibra foi variado modificando-se a espessura das folhas de policarbonato. Os resultados mostraram que o tratamento com HEMA criou ligações covalentes por toda interface, permitindo cristalização segmentada e uma acoplagem aderente entre a fibra e a matriz, além disto o tratamento criou uma superfície rugosa na fibra, gerando um compósito com boas propriedades mecânicas.

CHAND & DWIVEDI, 2006, investigaram o comportamento abrasivo de compósitos de polipropileno/fibras de juta em função da adição de anidrido maleico graftizado com polipropileno (MAPP). Foi utilizado um misturador interno para se incorporar as fibras a matriz polimérica, e uma prensa hidráulica com aquecimento para conformá-los. O tratamento com o agente de acoplamento, foi realizado de duas maneiras: 1ª) as fibras foram tratadas por 5 mim com uma solução de 1% de MAPP dissolvido em tolueno; 2ª) 1% de

MAPP foi adicionado na etapa de mistura no misturador interno. Os resultados demonstraram que a adição do agente de acoplamento melhora sensivelmente a interface, principalmente quando as fibras foram tratadas previamente, fazendo com que o compósito apresente melhores propriedades mecânicas e uma temperatura de fusão mais elevada do que as fibras não tratadas. A adição do MAPP, também aumenta a resistência ao desgaste dos compósitos polipropileno/fibras de juta, principalmente quando incorporado durante a fusão.

PARK, *et al.*, 2006, buscaram correlacionar as propriedades mecânicas com a interface de compósitos polipropileno-copolímero polipropileno anidrido maleico (MAPP), utilizando técnicas de micromecânica e emissão acústica. Os compósitos com fibras simples (que passaram por tratamentos alcalino, com agentes silano e térmico), foram preparados por compressão a quente, colocando-se a fibra entre dois filmes de polipropileno/MAPP. Os autores verificaram que a tensão de cisalhamento interfacial aumenta com o teor de MAPP, possivelmente, devido ao número de grupos polares introduzidos na matriz. Esta tensão também aumenta, para compósitos com fibras tratadas com agentes silanos e com solução alcalina. Os autores reportam que as propriedades mecânicas dos compósitos decrescem com o aumento da temperatura durante o tratamento térmico e aumentam pouco com tratamento alcalino.

DOAN, *et al.*, 2006, estudaram o comportamento de compósitos juta/polipropileno, quando a matriz foi modificada pelo copolímero polipropileno graftizado com anidrido maleico (MAPP). Neste estudo foram utilizadas duas matrizes, uma com alto e outra com baixo índice de fluidez. A incorporação das fibras à matriz foi feita através de uma extrusora de dupla rosca co-rotacional.

O polipropileno, puro e com o agente de acoplamento (a 2%, em peso), foi colocado na extrusora dupla-rosca e a fibra, por sua vez, foi incorporada, quando o polipropileno já estava fluido. O material extrusado foi resfriado por imersão em água, triturado e injetado. Para análise dos compósitos foram utilizados testes mecânicos e micro-mecânicos. As características da fibra também foram investigadas. Os autores concluíram que: a adição de 2%, em peso, de (MAPP) ao polipropileno melhora sensivelmente a adesão fibra-matriz, gerando um compósito com melhores propriedades mecânicas; o polipropileno de maior massa molaecular (menor índice de fluidez) apresentou propriedades mecânicas superiores ao de menor massa molecular; o módulo elástico dos compósitos estudados aumentaram com o com o teor de fibra e o agente de acoplamento não alterou esta propriedade; as propriedades têenseis dos compósitos, com agente de acoplamento, aumentam com o tempo envelhecimento em câmara úmida; o valor de saturação para absorção de umidade nos compósitos estudados encontra-se entre 10 e 20%, em peso, dependendo da umidade relativa, quanto maior a umidade relativa maior a absorção.

MONTEIRO, *et al.*, 2006, utilizaram tecidos de juta descartados, provenientes de sacos da aniagem, para reforçar uma matriz de polietileno reciclado, com o intuito de se produzir um material barato que pudesse substituir peças de madeira tanto na construção civil como na produção de móveis. Para a produção dos compósitos foi utilizado um molde retangular onde foi acomodado o tecido, e em seguida depositado uma certa quantidade de polietileno (em partículas). O teor de fibra variou de 0 a 40% em peso. Os resultados mostraram que a resistência mecânica aumenta com o teor de fibra

até 30% em peso. Acima deste valor houve uma queda na resistência do compósito que mesmo assim, manteve-se maior do que a da matriz de polietileno. O estudo revelou que o entrelaçamento dos fios do tecido de juta e a efetiva aderência do polietileno às fibras contribuem para o desempenho mecânico do compósito e que, para teores mais elevados de fibra, o processamento utilizado gera um grande número de vazios, sem no entanto comprometer o efeito do reforço. Por fim, os autores fizeram uma avaliação preliminar do possível preço de comercialização dos compósitos, e os mesmos mostram-se relativamente competitivos.

MOHANTY, *et al.*, 2006, realizaram um estudo experimental sobre as propriedades mecânicas e viscoelásticas de compósitos de polietileno de alta densidade/fibras de juta, tratadas e não tratadas com MAPE (polietileno graftizado com anidrido maleico). Foi observado que as propriedades mecânicas aumentam até um teor de fibra em torno de 30% em peso, e que o tratamento com MAPE gera melhores resultados do que as fibras não tratadas.

KHONDKER, *et al.*, 2006, desenvolveram uma nova técnica de produção de compósitos reforçados por fios unidirecionais de juta. Este processo se baseia na técnica de entrelaçamento tubular, utilizado para produzir um material intermediário chamado *microbraid yarn* (MBY) com os fios de juta envoltos por fios entrelaçados de polipropileno e de PLA (ácido polilactico). Após a confecção do fio, os mesmos são colocados de forma alinhada no molde e comprimidos a quente. Para os compósitos com PLA, os resultados mostraram que a resistência à tração e o módulo elástico aumentam com o aumento do teor de fibra. Já o comportamento na flexão é o oposto ao apresentado na tração. Por outro lado, os compósitos juta/PP tiveram as

propriedades tênsis e de dobramento melhoradas significativamente com a adição das fibras de juta como reforço.

ACHA, *et al.*, 2007, utilizaram tecidos bidirecionais de juta e polipropileno para estudar as propriedades dinâmico-mecânicas, quando ao sistema é adicionado dois agentes de acoplamento, lignina e é feito tratamento nas fibras. O processo de incorporação utilizado foi o *film stacking*, no qual a tecido de juta é colocado entre filmes de PP. Estes filmes foram produzidos através de uma prensa hidráulica operando a 180°C. Os agentes de acoplamento e a lignina comercial foram incorporados ao PP através de um misturador interno. Quanto à fibra, foi feito um tratamento de esterificação, e as fibras foram secas em estufa sob vácuo à 70 °C antes da incorporação. Os resultados obtidos demonstraram que a interface sofre modificações quando a fibra é tratada tanto com agentes de acoplamento quanto por tratamentos químicos. As propriedades mecânicas dos compósitos com tecidos bidirecionais foram melhores do que as com fibras curtas.

CAPÍTULO VI

6.0 Modelagem Matemática

Existe uma série de modelos matemáticos que podem ser utilizados para prever e/ou validar dados experimentais. Neste trabalho foi utilizado a regra das misturas para determinação do módulo de elasticidade e da resistência à tração, nas direções axial e transversal. Para a determinação da rigidez em diferentes ângulos, bem como para a determinação do módulo de cisalhamento, foram utilizadas as equações propostas por HARRIS (1980) e por HULL & CLYNE (1996). Para determinação da resistência à tração em diferentes ângulos e da tensão de cisalhamento do compósito, foi utilizado a teoria da máxima tensão, além do critério de Tsai-Hill (HALPIN & KARDOS, 1976).

6.1 Regra das Misturas

A regra da mistura é o modelo mais simples utilizado para prever as propriedades elásticas de um compósito.

Para calcular o módulo elástico para a direção 1 (axial) – E_1 - do compósito (Figura 13), assume-se que tanto a matriz quanto a fibra exibem a mesma deformação - ε_1 . A deformação do compósito é resultado da tensão - σ_1 , aplicada a área da secção transversal do compósito (A). Sendo assim, o módulo elástico aparente na direção da fibra é dado por (JONES, 1975):

$$E_1 = E_F V_F + E_M V_M \quad (3)$$

Onde: E_F , V_F , E_M e V_M são respectivamente módulo elástico e fração volumétrica da fibra e da matriz.

Este modelo funciona extremamente bem para compósitos com fibras contínuas alinhadas, onde o critério básico assumido, mesma deformação para os dois componentes do compósito, é correto (FACCA, 2005)

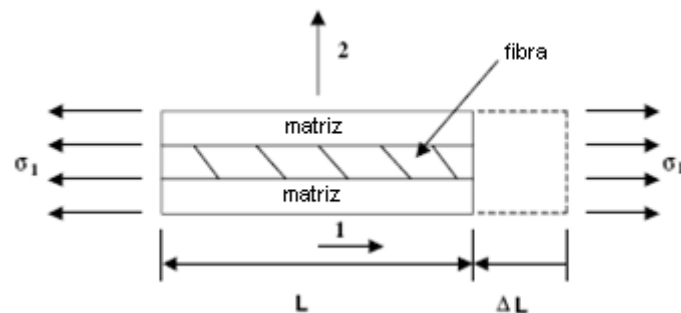


Figura 13 - Representação esquemática do esforço sofrido pela fibra e pela matriz na direção 1

Esta regra também é aplicada para o cálculo do módulo de cisalhamento e do coeficiente de Poisson do compósito.

O módulo elástico do compósito na direção 2 (E_2), ou transversal, é determinado assumindo que a tensão aplicada (σ_2) é a mesma tanto na fibra quanto na matriz, como mostra a Figura 14.

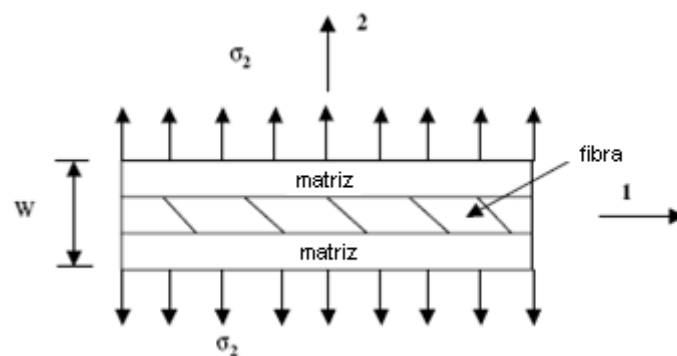


Figura 14 - Representação esquemática do esforço sofrido pela fibra e pela matriz na direção 2

O resultado obtido para E_2 , é obtido pela equação inversa da regra das misturas que é dada por (JONES, 1975):

$$E_2 = \frac{E_F E_M}{V_M E_F + V_F E_M} \quad (4)$$

6.3 Equações de Harris e, Hull e Clyne – Para o módulo de elasticidade

Para o cálculo do módulo elástico fora dos eixos foi assumido que os compósitos apresentam um comportamento ortotrópico, apresentam um estado plano de tensões, e que o módulo elástico, em função do ângulo da fibra (E_θ), pode ser estimado pela seguinte equação (HULL & CLYNE, 1996):

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\cos^4 \theta}{E_x} + \frac{\sin^4 \theta}{E_y} + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \quad (5)$$

Onde G é o módulo de cisalhamento do compósito, ν é o coeficiente de Poisson e os subscritos x e y referem-se aos eixos (x direção axial e y transversal). Duas constantes não são conhecidas na equação ν_{xy} e G_{xy} . O primeiro é estimado em função do coeficiente de Poisson da matriz. O segundo pode ser estimado através das expressões semi-empíricas desenvolvidas por Halpin e Tsai. Lembrando que G_{xy} é o módulo de cisalhamento do compósito e que sofre influência do módulo de cisalhamento da matriz (G_m) e da fibra (G_f).

$$G_{xy} = \frac{G_m(1 + \xi\eta V_f)}{(1 - \eta V_f)}, \text{ onde } \eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi} \quad (6)$$

ξ é um parâmetro de ajuste, que para fibras alinhadas e contínuas é igual a 1.

Se as propriedades tênséis da matriz são consideradas isotrópicas, então G_m , pode ser calculado pela seguinte equação.

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (7)$$

Com estes modelos e com base nos dados experimentais, pode-se estimar o módulo de cisalhamento da fibra e por conseqüência do compósito, além do módulo de elasticidade em diferentes ângulos. Estes resultados servem para caracterizar o material compósito como um todo. Se os compósitos com fibras naturais alinhadas vierem a ser utilizadas em aplicações estruturais, as propriedades fora do eixo serão fundamentais para predizer a resposta dos mesmos com aplicação de cargas em qualquer direção (MADSEN, 2004). Segundo (MADSEN, 2004), na literatura, além de seu trabalho, existem apenas três estudos que relatam as propriedades fora dos eixos para compósitos com fibras naturais alinhadas, são eles: um estudo com compósitos poliéster/juta testados nas direções 0, 45 e 90° (KUMAR, 1986); um estudo com epóxi e linho testados nas direções 0 e 90° (Van de WEYENBERG, *et al.*, 2003); e, um estudo com compósitos epóxi/juta testados a 0, 10, 17, 25, 37, 50, 63 e 80° realizado por CICHOCKI Jr. e THOMASON, 2002.

6.4 Teoria da Máxima Tensão e Critério de Tsai-Hill - Para as tensões

Este modelo é utilizado para se estimar o valor máximo de tensão suportado pelo compósito em diferentes ângulos (σ_θ). Para tanto leva em consideração três possíveis causas para a ruptura do compósito, que são definidas pelas equações abaixo:

$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_x}{\cos^2\theta}$ (8) (falha do compósito controlada pela fratura em tração das fibras – Fig. 15 A);

$\sigma_{\theta} = \frac{\tau_{xy}}{\sin\theta\cos\theta}$ (9) (falha do compósito controlada pelo cisalhamento paralelo com as fibras – Fig. 15 B);

$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_y}{\sin^2\theta}$ (10) (falha do compósito controlada pela tensão normal as fibras – Fig. 15 C).

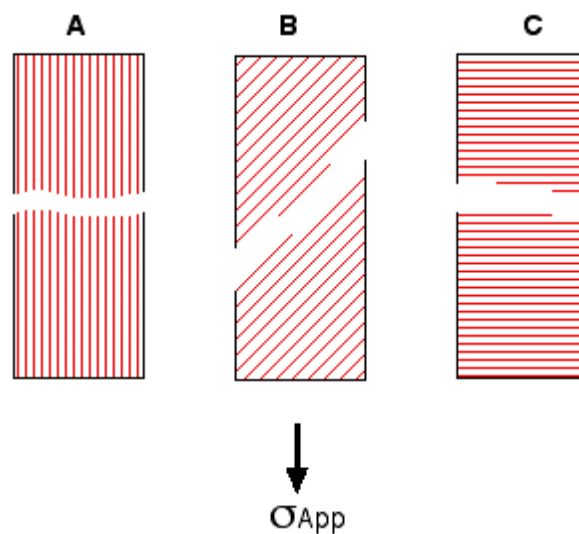


Figura 15 - Formas de falhas de um compósito tensionado

Este modelo foi utilizado para estimar o valor da tensão de cisalhamento dos compósitos, ajustando o mesmo aos valores experimentais.

Além deste modelo foi utilizada a equação de Tsai-Hill, para se determinar o valor da tensão de cisalhamento dos compósitos em estudo, ajustando-se os valores teóricos com os experimentais. Deve-se, ressaltar, que tanto a teoria da máxima tensão quanto a equação de Tsai-Hill não levam em consideração, de forma direta (ou seja, na própria equação), as características

dos compósitos, sendo utilizados apenas os valores numéricos obtidos nos ensaios.

$$\frac{1}{\sigma_{\theta}^2} = \frac{\cos^2\theta(\cos^2\theta - \sin^2\theta)}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^4\theta}{\sigma_y^2} + \frac{\cos^2\theta\sin^2\theta}{\tau_{xy}^2} \quad (11) \text{ (equação de Tsai-Hill)}$$

CAPÍTULO VII

7. Materiais e Métodos

7.1 Materiais

7.1.1 Fios de Juta

Os fios de juta utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela Companhia Têxtil Castanhal, Pará, na forma de rolos (Figura 16), sem qualquer tratamento, de classificação 10/1 e 10/2 (Figura 17a e 17b, respectivamente). O fio classificado como 10/1 é formado por uma única perna e apresenta um diâmetro em torno de 1 mm, enquanto que o 10/2 é formado por duas pernas retorcidas e apresenta um diâmetro em torno de 1,5 mm.



Figura 16 - Rolo de fio de juta



Figura 17 – Fios de juta. a) 10/1; b) 10/2

6.1.2 Matrizes

Na primeira etapa deste trabalho, que trata do desenvolvimento do processo, foram utilizados filmes de polietileno linear de baixa densidade (PEBDL), produzidos pelo Mercur S.A., com matéria-prima, fornecida pela Ipiranga Petroquímica S.A., referência LBH0120BP, e propriedades mostradas na Tabela 8. Os filmes são sacolas plásticas utilizadas originalmente para arquivar documentos, nas dimensões 230 x 305 mm x 8 µm (Figura 18)

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas do PEBDL

Propriedades	Normas	Unidades	Valores
Densidade	ASTM D 1505-03	g/cm ³	0,917±0,002
MFR 190/2,16	ASTM D 1238-04c	g/10 min	0,75±0,15
MFR 190/21,6	ASTM D 1238-04c	g/10 min	20±4
FRR	ASTM D 1238	-	26±2
Tensão no escoamento (em filme – DL/DT)	ASTM D 882-02	MPa	12/12
Alongamento no escoamento (em filme – DL/DT)	ASTM D 882-02	%	19/12
Tensão na ruptura (em filme DL/DT)	ASTM D 882-02	MPa	44/38
Alongamento na ruptura (em filme DL/DT)	ASTM D 882-02	%	790/900
Resistência ao impacto pela queda do dardo (em filme)	ASTM D 1709-03	g-F50	230

Fonte:(Ipiranga Petroquímica)



Figura 18 - Filme de PELBD produzidos pela Mercur, dobrados ao meio

Na segunda etapa desta pesquisa, após o desenvolvimento do processo de incorporação das fibras, foram utilizados dois tipos diferentes de polipropileno. A mudança de matriz ocorreu devido à necessidade de se averiguar o comportamento dos compósitos quando se modifica o índice de fluidez. Os dois polipropilenos são homopolímeros. Para utilizá-los como matriz neste processo foi necessária a transformação destes em filmes, produzidos no próprio laboratório (detalhes no próximo tópico). Os polipropilenos utilizados foram fornecidos pela Braskem, com as referências H301 e H103. O primeiro (H301) é um polipropileno de médio índice de fluidez, aditivado para uso geral, sendo indicado para processos de moldagem por injeção e extrusão de fibras. O H103, por sua vez, é uma resina de polipropileno de alto índice de fluidez aditivada para uso geral, indicada para moldagem por injeção (Portal Braskem). As propriedades típicas destes polímeros são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades típicas do PP H 301e H103

H301			
Propriedades	Norma ASTM	Unidades	Valores
Índice de fluidez (230°C/2,16kg)	D -1238-L	g/10 mim	10
Densidade	D-792A	g/cm ³	0,905
Módulo de flexão	D-790	GPa	1,53
Resistência à tração no escoamento	D-638	MPa	33
Alongamento no escoamento	D-638	%	13
Dureza Rockwell	D-785-A	Escala R	90
Resistência ao impacto IZOD a 23°C	D-256-A	J/m	30
H103			
Índice de fluidez (230°C/2,16kg)	D -1238-L	g/10 mim	40
Densidade	D-792A	g/cm ³	0,905
Módulo de flexão	D-790	GPa	1,47
Resistência à tração no escoamento	D-638	MPa	35
Alongamento no escoamento	D-638	%	12
Dureza Rockwell	D-785-A	Escala R	96
Resistência ao impacto IZOD a 23°C	D-256-A	J/m	25

Fonte: (Portal Braskem)

7.2 Metodologia – Desenvolvimento do processo

O processo desenvolvido é um misto entre o *filament winding* e o *film stacking*. É utilizado o *filament winding* para produzir lâminas (filmes) com matriz termoplástica e fibras alinhadas de juta. Em seguida, estes filmes são empilhados e comprimidos para a formação dos compósitos propriamente ditos.

Nesta seção será descrito o processo utilizado para a incorporação de fibras alinhadas de juta em matriz de PE e de PP. O processo básico é o mesmo, havendo pequenas modificações no processamento entre eles. Estas diferenças são relatadas a seguir.

7.2.1 – Descrição do Processo com Filmes de PELDB

Na primeira etapa, uma placa metálica de alumínio (Figura 19), é envolta pelo filme de PELDB. Em outras palavras, dobra-se o(s) saco(s), e coloca-se a placa metálica no centro do(s) mesmo(s).



Figura 19 - Placa metálica de alumínio envolta por filmes de PELBD

Na segunda etapa o fio de juta, referencia 10/2, é enrolado, manualmente (Figura 20), no conjunto (placa metálica e filme plástico) descrito

anteriormente, começando em uma extremidade da placa e terminando na outra.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 20 - (a), (b) e (c) processo manual de incorporação das fibras de juta; (d) placa completamente encoberta pelas fibras alinhadas de juta

O produto obtido da etapa anterior (Figura 20 (d)), novamente é envolto por filme plástico (Figura 21). Assim, o conjunto fica sendo formado por uma camada de filme, acima desta, fibras alinhadas de juta, e recobrendo todo arranjo mais uma camada de filme.



Figura 21 - Conjunto formado por filme, fibra e filme

O sanduíche obtido na etapa anterior (Figura 21) foi colocado em estufa a uma temperatura de 80°C por um período de 45 minutos para reduzir a umidade das fibras. Segundo (CARVALHO, *et al.*, 2005), estas são a temperatura e o tempo de secagem que geram melhores propriedades com um menor consumo de energia. Decorrido este tempo, o material é retirado da estufa e colocado entre duas placas metálicas de alumínio e levado a uma prensa hidráulica aquecida a 160°C. Inicialmente, o material fica apenas em contato com as placas aquecidas da prensa, por um período de 10 minutos e, após este tempo, uma força de 2 ton é aplicada (o que equivale a uma pressão de aproximadamente 654 KPa), também por 10 minutos. Quando então, o material é retirado da prensa e deixado resfriar ao ar.

O excesso de material plástico é retirado da placa e um corte foi feito nas bordas da placa, de modo a retirar a lâmina metálica interna. Obtêm-se duas lâminas com as fibras alinhadas (Figura 22).



Figura 22 - Lamina obtida ao final do processo

As lâminas foram pesadas e o teor de fibra em peso foi determinado por gravimetria (ver item 7.2.2, pg. 68).

Em seguida as lâminas (Figura 22) foram empilhadas em um molde metálico bipartido, colocando-se entre elas um filme de PELBD. Desta forma, foram obtidos compósitos com diferentes configurações em relação a orientação do reforço. Para se consolidar o compósito, o molde metálico, com as lâminas em seu interior, foi colocado em uma prensa hidráulica aquecida a 160°C, por 15 minutos, sem aplicação de força. Passado este tempo uma força de 5 ton (equivalendo a 1,64 MPa) foi aplicada durante 10 minutos, e ao final deste período, o molde foi retirado da prensa e deixado esfriar ao ar.

Foram obtidos compósitos laminados com duas e três lâminas nas seguintes configurações definidas na Tabela 10:

Tabela 10 - Configuração dos compósitos com PELDB

N° de Lâminas	Configuração
2	f+ +f+ +f
3	f+ +f+ +f+ +f
3	f+ +f+≡+f+ +f

Onde:

||| - placa de filme com fibras alinhadas na direção 0° - direção 1- longitudinal

≡ - placa de filme com fibras alinhadas na direção 90° - direção 2 - transversal

f – filme de polietileno colocado por cima e entre as lâminas do compósito antes da conformação do mesmo

7.2.2 Descrição do Processo com Filmes de PP

O processo de confecção das lâminas com PP e fibras alinhadas de juta é semelhante ao descrito com os filmes de PELDB, com pequenas modificações. A principal delas é a inclusão de uma etapa para a produção de filmes planos. Estes filmes foram produzidos em uma prensa hidráulica operando a $160 \pm 10^\circ\text{C}$ (temperatura mantida igual para os dois tipos de polipropilenos), a partir dos grânulos. Estes foram colocados entre duas lâminas metálicas e levados a prensa hidráulica, onde permaneceram durante 10 min., nos cinco minutos iniciais sem que qualquer pressão fosse aplicada, mantendo-se, apenas o contato com as placas aquecidas da prensa. Nos últimos cinco minutos, após uma interrupção momentânea do contato com as placas, foi aplicada uma carga de 2 ton (aproximadamente 654 KPa). sobre o material. Em seguida o material foi resfriado ao ar, e o filme obtido foi removido e cortado nas dimensões necessárias para a etapa posterior. O produto obtido apresenta uma espessura inferior a 1 mm (Figura 23).

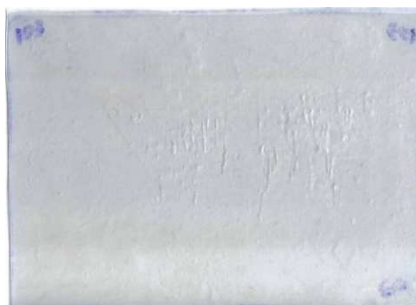


Figura 23 - Filmes de Polipropileno

No estudo com o polipropileno, foram utilizados os fios de juta classificados como 10/2 e 10/1. A moldagem das laminas, neste caso, foi realizada no mesmo molde utilizado para produzir o laminado, com tempos menores¹, 10 minutos com as placas aquecidas da prensa encostada no molde metálico e 5 minutos com uma carga de 2 ton (654 KPa). Seguindo-se, a partir daí, o resfriamento, e o processo de desmoldagem e de retirada das laminas.

A confecção dos compósitos foi realizada da mesma forma que foi descrito para os filmes de PELBD. Modificou-se apenas, o tempo e carga utilizada no processo de compressão, que foi a mesma utilizada para produzir as laminas. Foram produzidos compósitos com uma², duas e três camadas de fibra sem qualquer tipo de tratamento. Neste caso não foram utilizados filmes intercalando as laminas, a não ser para os compósitos com duas camadas.

A secagem prévia das fibras de juta foi realizada somente para a produção dos compósitos com duas camadas de fibra, sendo os resultados obtidos comparados com àqueles obtidos para os compósitos com esta mesma configuração sem este tipo de tratamento. A secagem prévia das fibras foi realizada em uma estufa a 80°C durante 1h. Para diminuir a absorção de umidade, o processo de fechamento do molde ocorreu dentro da estufa nos últimos 15 minutos do processo (isto é, o molde, a fibra e os filmes foram colocados dentro da estufa, e faltando 15 minutos para se completar os 60 minutos de secagem, todo o material foi colocado dentro do molde; permanecendo assim até completar o tempo de secagem). Após a secagem o molde foi levado a prensa, seguindo o processo normal. Vale ressaltar que este

¹ O tempo foi reduzido devido aos índices de fluidez dos polipropilenos

² Somente para o PP H 103 e com fio 10/2

processo de secagem ocorreu na confecção das lâminas, e assume-se que deste ponto em diante não há mais absorção (ou esta é bem diminuída), pois as fibras estão completamente recobertas pela matriz.

Na Tabela 11, estão sumarizadas as semelhanças e as diferenças entre os processos de produção de compósitos com filme de PELBD e PP.

Tabela 11 - Semelhanças e diferenças entre os processos com PELBD e PP

Etapas	PELBD	PP
Origem dos filmes	Comercial	Produzido em laboratório
Enrolamento das fibras	Manual	Manual
Tipo de fio utilizado	10/2	10/1 e 10/2
Secagem prévia das fibras em estufa	Sim	Não – para todos os compósitos; Sim – somente para os compósitos com duas camadas
Tempo, temperatura e carga utilizada na produção das laminas	20 min., 160°C e 2 ton.	15 min., 160°C e 2 ton.
Tipo de molde utilizado para a produção das laminas	Não foi utilizado molde	Molde metálico bipartido
Arranjo dos compósitos	Duas e três camadas com filmes intercalando estas camadas em diferentes direções.	Uma, duas e três camadas, somente com fibras alinhadas em uma única direção. Com uma camada o molde foi preenchido completamente com filmes. Com duas camadas uso-se um filme entre as camadas
Molde utilizado para produzir os compósitos laminados	Molde metálico bipartido	Molde metálico bipartido
Tempo, temperatura e carga utilizada para produzir os compósitos	25 min., 160°C e 5 ton.	15 min., 160°C e 2 ton.

7.2.3 Determinação do Teor de Fibra

O teor de fibra foi calculado por gravimetria, da seguinte maneira: a massa da placa metálica (MPM) e dos filmes (Mfil) foram aferidas antes de se enrolar as fibras aos mesmos. Após o enrolamento das fibras, fez-se uma nova medida (MC), desta vez, contendo a placa metálica, os filmes plásticos e a fibra. A massa de fibra, MF, foi obtida subtraindo de MC os valores de MPM e de Mfil. A quantidade de fibra não se modifica no restante do processo. Desta forma, após a etapa de compressão, e depois da retirada da placa metálica, as laminas tiveram sua massa aferida (ML), sendo a mesma composta pelas fibras e pelo plástico, e como a quantidade de fibra é “imutável” no processo, calcula-se o teor de fibra presente nas laminas de acordo com a equação abaixo:

$$\text{Teor de fibra, em peso (\%)} = \frac{MF}{ML} \times 100 \quad (12)$$

Quando se produz o compósito, com uma ou mais de uma lâmina, procede-se da mesma maneira. Isto é, levando-se em consideração que o teor de fibra na lâmina é imutável durante o processo. Assim sendo, sabe-se, antecipadamente a quantidade de fibra presente no compósito e quando o mesmo é consolidado, subtrai-se a massa de fibra da massa total do compósito, e posteriormente divide-se a massa de fibra pela massa total do compósito para se encontrar o teor de fibra (vide exemplo, em anexo).

7.3 Ensaios Mecânicos

7.3.1 Confeção dos corpos de prova para ensaios de tração e flexão

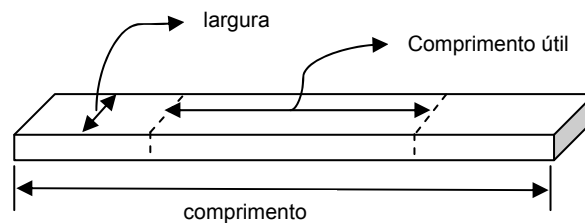
Os corpos de prova na forma de barras retangulares foram serrados a partir dos laminados, e o acabamento dado por lixas nº 100 e 180. Deste modo, corpos de prova para ensaios de tração segundo a norma ASTM D 3039 foram obtidos com as seguintes dimensões médias:

Comprimento: 120 mm;

Largura: 12,7 mm;

Espessura: 1,9 – 3,4 mm;

Comprimento útil: 60 mm.



Para o ensaio de flexão (ASTM D 790) foram utilizados corpos de prova, no mínimo seis, com as mesmas dimensões que os utilizados no ensaio de tração.

6.3.2 Ensaio de tração e de flexão

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaio - LLOYD Instruments – LR10K - operando a uma velocidade de 10 mm/min em sala climatizada a 25°C. E os resultados reportados foram: resistência à tração, módulo elástico e alongamento na ruptura, como média de seis corpos de prova (algumas curvas tensão x deformação são mostradas em anexo).

Para os ensaios de flexão foi utilizada a mesma máquina, operando a uma velocidade de 0,5 mm/min e com uma distância entre os apoios de 60 mm. Como o compósito não se rompe, foi atribuído como deflexão máxima 5% da distância entre os apoios, o que equivale a 3 mm. O valor do módulo de

elasticidade foi calculado através das curvas de carga x deformação, utilizando a seguinte fórmula:

$$E_B = \frac{L^3 m}{4db^3} \quad (13)$$

Onde:

E_B = módulo de elasticidade ao dobramento (MPa);

L = distância entre os apoios do corpo de prova (mm);

b = largura da seção transversal do corpo de prova (mm);

d = altura da seção transversal do corpo de prova (mm);

m = declive da tangente à porção retilínea inicial da curva carga-deformação (N/mm de deflexão).

Também é reportada a resistência à flexão para a deflexão de 3 mm. Este ensaio foi realizado apenas para os compósitos com matriz de polipropileno (em anexo, são apresentadas algumas curvas carga x deformação).

7.3.4 Ensaio de Impacto

Os ensaios de impacto, realizados apenas com os compósitos produzidos com PP, foram realizados com corpos de prova não entalhados, em uma máquina CEAST (RESIL 5,5), tendo como acessório um pendulo de 2,75 J. Para se obter a resistência ao impacto, foi desprezada a resistência do ar, e o valor medido de energia foi dividido pela espessura do corpo de prova. Foram utilizados seis corpos de prova em cada uma das medidas e a temperatura ambiente durante o ensaio foi de 25°C.

7.3.5 Ensaio de Tração dos Fios de Juta

Os cordões de juta referência 10/1 e 10/2 foram ensaiados em tração, utilizando para isto as mesmas condições descritas para os ensaios dos compósitos. Sendo que neste caso foram realizadas pelo menos dez medidas para cada um dos fios. O diâmetro utilizado foi de 1 mm para o fio 10/1 e de 1,7 mm para o fio 10/2, em anexo são apresentadas as curvas tensão x deformação para estes fios.

CAPÍTULO VIII

8. Resultados e Discussão

Neste trabalho foram analisadas as propriedades mecânicas de compósitos feitos com polietileno linear de baixa densidade e polipropileno, utilizando como reforço fios longos, contínuos e alinhados de juta. Os resultados obtidos para cada matriz utilizada são apresentados e discutidos separadamente. Primeiro serão apresentados os resultados mecânicos para os compósitos com PELBD, os quais não foram muito aprofundados devido a mudança de matriz, sendo este o embrião para o estudo com o PP.

8.1 O Processo

O processo utilizado para se incorporar fibras longas, contínuas e alinhadas de juta em matriz termoplástica, mostrou-se viável, e não requer maquinário sofisticado. O processo pode ser utilizado tanto com filmes produzidos comercialmente quanto com filmes de material reciclado. Com este processo, que é um misto do processo *filament winding* e *film stacking*, pode-se, ao contrário de processos semelhantes descrito por MADSEN, 2004, e por KHONDKER et al. 2006, ou do processo de pultrusão descrito por van de VELDE & KIEKENS, 2001, produzir compósitos com propriedades mais isotrópicas. O processo de *film stacking*, permite arranjar as camadas, de modo que se tenha as fibras alinhadas em diferentes direções.

8.2 Propriedades Mecânicas dos Compósitos PELBD/Fios de Juta

Os dados obtidos para as propriedades de compósitos com matriz de polietileno linear de baixa densidade com fios juta, 10/2, estão sumarizados na Tabela 12. Os valores estão dispostos em função do teor de fibra e do arranjo

das lâminas nos compósitos. Primeiramente o comportamento do compósito em função do teor de fibras será interpretado. Em seguida, o efeito do arranjo e da orientação das fibras, será avaliado.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas dos compósitos PELBD/fios unidirecionais de juta

N° de Camadas	Configuração	Teor de fibra, em peso (%)	Módulo Elástico (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação (%)
0	-	0	0,346±0,049	9,264±0,409	Acima de 300
2	f+ +f+ +f	30,0±2,5	3,019±0,457	42,300±5,473	2,628±0,722
3	f+ +f+ +f+ +f	44,0±3,0	3,628±0,312	53,703±4,698	2,973±0,366
3	f+ +f+≡+f+ +f	44,0±2,8	2,717±0,149	33,798±4,667	2,137±0,331
3	f+≡+f+≡+f+≡+f	44,0±3,2	0,220±0,063	2,095±0,209	12,951±1,337

7.2.1 - Influência do teor de fibra – direção Axial

Ao analisar os dados reportados na Tabela 12 e ilustrados na Figura 24, verifica-se que todas as propriedades analisadas aumentaram com o teor de fibra, exceção feita à deformação.

Este comportamento era o previsto e ocorre devido às características individuais dos componentes do compósito. As fibras de juta são mais resistentes, rígidas e menos extensíveis do que a matriz PELBD. Portanto, de acordo com a regra das misturas, quanto maior o teor de fibras, mais resistente e rígido será o compósito. Para o teor de 30% de fibra (ou duas camadas), obteve-se um aumento no módulo de elasticidade de cerca de 870%, e para resistência à tração o aumento foi de 456% em relação à matriz (PELBD). Para o teor de 44%, em peso de fibra, as propriedades também aumentaram em

relação ao PELDB (1048% em relação ao módulo elástico; e, 580% para a resistência à tração). Além das características das fibras de juta, estes bons resultados mecânicos estão ligados a configuração do compósito. Pois, para este caso, todas as fibras estão alinhadas na direção do esforço, otimizando desta forma as propriedades mecânicas em estudo.

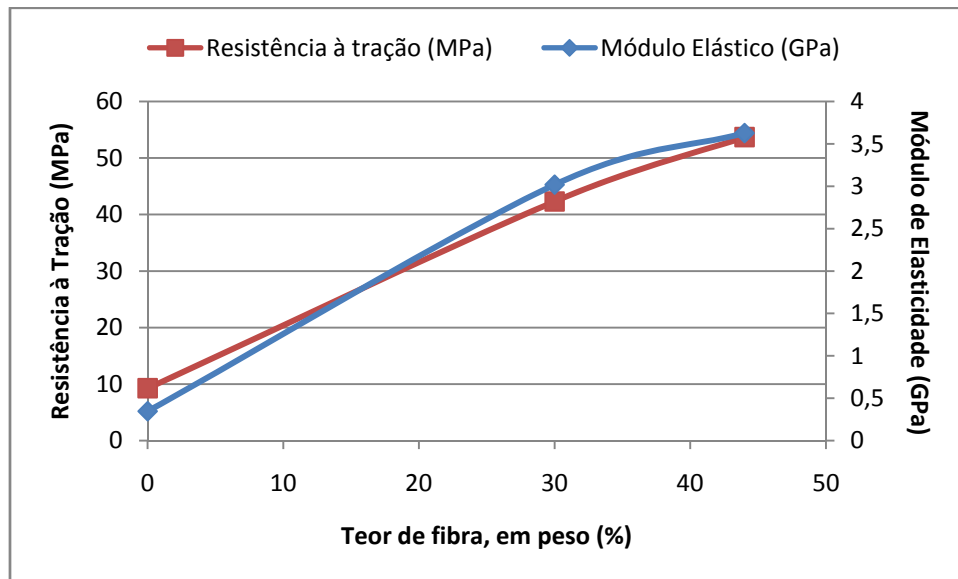


Figura 24 - Comportamento mecânico dos compósitos PELBD/fios alinhados de juta - Influência do teor de fibra: módulo elástico e resistência à tração.

8.2.2 – Influência do arranjo do compósito

Quando se analisa a configuração do compósito, isto é, de que forma as camadas de fibra são arranjadas para formar o mesmo, mantendo-se fixo o teor de fibra e o número de camadas, pode-se observar o seguinte (Figura 25):

- O aumento do número de fibras (camadas) na direção 2, transversal, provoca uma redução no módulo elástico e na resistência à tração e um

aumento no alongamento, principalmente quando as três camadas estão dispostas, perpendicularmente ao esforço.

Este comportamento se deve ao fato de que quando as fibras são dispostas perpendicularmente ao esforço, elas não agem como reforço. Logo, se a quantidade de fibras alinhadas na direção do esforço diminui, há um decréscimo nos valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração. Por outro lado, se todas as fibras estão alinhadas na direção 2, transversalmente, as propriedades dos compósitos são controladas pela matriz, ao contrário do que acontece quando todas as fibras estão alinhadas axialmente (direção 1), onde as propriedades dos compósitos são controladas pelas fibras. Sendo assim, há uma tendência de que quanto mais fibras alinhadas na direção 2 (transversalmente ao esforço), mais baixos sejam as propriedades mecânicas. Neste caso específico, o módulo de elasticidade e a resistência à tração foram inferiores aos resultados obtidos para o PELBD.

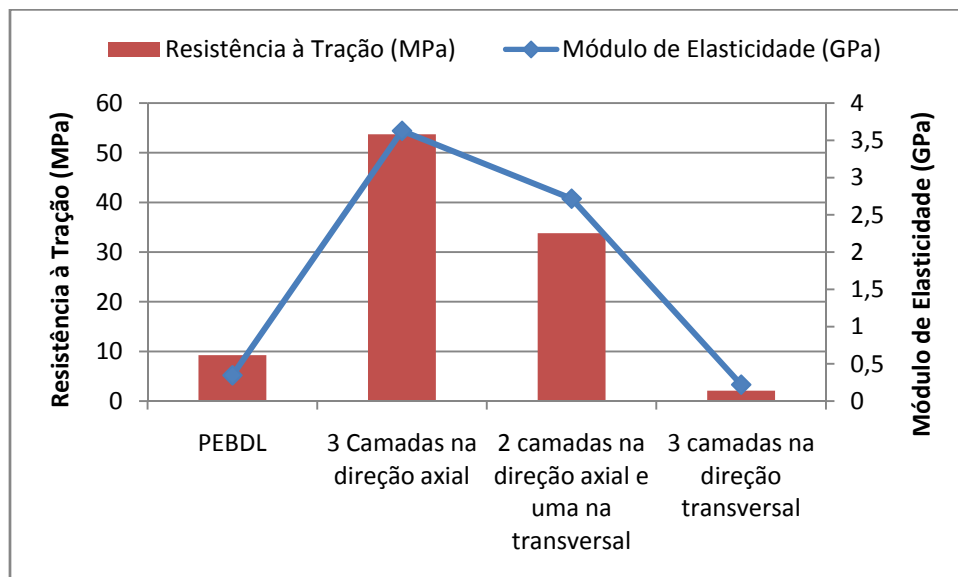


Figura 25 - Propriedades mecânicas dos compósitos PELBD/fios unidirecionais de juta: Influência do arranjo (módulo elástico e resistência à tração)

Não existem muitos relatos da utilização de fibras vegetais contínuas e alinhadas em matriz de polietileno, um dos poucos trabalhos existentes, HERRERA-FRANCO & VALADEZ-GONZÁLEZ, 2004, pode servir de parâmetro de comparação para os nossos dados. Os autores utilizaram como matriz um polietileno de alta densidade e como fibra o *henequen* (agave fourcroydes), com um teor de 46% de fibra em volume. Os resultados obtidos por eles demonstraram que na direção longitudinal os valores são bem maiores do que aquele para a direção transversal, para o módulo de elasticidade estes valores foram respectivamente, 2,5 GPa e 0,46 GPa, e para a resistência à tração foram 71,8 MPa e 5,0 MPa. Deve-se ressaltar que estes valores são para a fibra sem tratamento e que estas, diferentemente do nosso trabalho, não foram utilizadas na forma de cordões.

Se compararmos os dados obtidos com compósitos produzidos com fibras curtas de juta e polietileno de alta densidade, verifica-se que o ganho nas propriedades mecânicas é imenso. Para um teor de 30% em peso de fibra de juta, os valores obtidos foram: 27,2 MPa e 1,2 GPa, respectivamente para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade (MOHANTY, *et al.*, 2006).

8.3 Propriedades Mecânicas dos Compósitos de PP e Fios de Juta em Tração

Na confecção dos compósitos com matriz de polipropileno foram utilizados dois tipos de polipropileno e dois tipos de fios de juta. Sendo os mesmos ensaiados em tração, flexão e impacto. Os resultados serão analisados separadamente, levando-se em consideração o tipo de matriz utilizado, a direção e o tipo de fio, a secagem das fibras, além, claro, do teor de fibra.

Na Tabela 13, estão sumarizados os resultados obtidos do ensaio de tração para os dois tipos de polipropileno em função do teor, da orientação e do diâmetro dos fios de juta.

É necessário salientar que como foi utilizado o mesmo perfil de temperatura, tanto para a produção dos filmes como para a confecção do compósito, o polipropileno com maior índice de fluidez, flui mais facilmente que o com menor índice, desta forma os valores médios dos teores de fibra para os compósitos com uma, duas e três camadas, apresentaram uma dispersão relativamente alta.

Outro fator prático que deve ser ressaltado é que os compósitos com uma camada de fibra apresentaram uma grande quantidade de bolhas. Isto porque, para assegurar o preenchimento do molde, foram adicionadas camadas extras de filme de PP. Contudo, apesar destes cuidados, a compactação não foi eficiente e obteve-se um produto com muitas bolhas superficiais, mas mesmo assim, ainda apresentaram propriedades superiores às da matriz, isto para os compósitos produzidos com o fio 10/2. Para os compósitos com o fio 10/1, a quantidade de bolhas e a dificuldade de se orientar os fios de juta no compósito, impossibilitaram os ensaios.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas, em tração, dos compósitos PP/fios de juta, em função do teor, do arranjo e do tipo de fio

Orientação das Fibras			Axial			Transversal		
PP	laminas	Teor de fibra, em peso (e em vol.) (%)	E(GPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	E(GPa)	σ (MPa)	ϵ (%)
PP Puro								
H 103	-	-	1,05±0,08	30,54±1,42	12,09±4,09	1,05±0,08	30,54±1,42	12,09±4,09
H 301	-	-	0,87±0,04	28,70±0,85	20,76±3,60	0,87±0,04	28,70±0,85	20,76±3,60
Fio 10/1								
H 103 (MFI = 40g/10mim)	2	32,28±4,42	4,72±0,41	60,24±4,07	1,90±0,40	1,21±0,25	12,47±0,63	2,65±0,41
	3	34,84±6,07	5,41±0,59	59,82±4,84	1,99±0,17	1,35±0,12	10,39±1,46	1,70±0,71
H 301 (MFI = 10g/10mim)	2	32,28±4,42	4,72±0,22	52,08±3,14	1,77±0,21	1,51±0,20	15,04±1,00	3,37±0,82
	3	34,84±6,07	4,10±0,22	46,04±4,73	1,65±0,18	1,38±0,04	14,96±1,33	3,38±0,28
Fio 10/2								
H 103 (MFI = 40g/10mim)	1	17,33±2,71	2,78±0,33	42,46±5,22	2,42±0,31	1,26±0,10	16,40±1,51	3,32±0,79
	2	32,91±6,10	4,34±0,35	58,10±3,49	1,96±0,22	1,34±0,08	12,7±2,37	2,77±0,78
	3	37,78±6,73	3,88±0,44	64,19±4,26	2,78±0,38	1,52±0,12	10,98±0,88	1,18±0,15
H 301 (MFI = 10g/10mim)	1	17,33±2,71	2,50±0,25	39,96±1,72	2,88±0,52	1,24±0,04	16,41±2,70	3,12±1,04
	2	32,91±6,10	4,11±0,16	55,90±4,31	2,22±0,22	1,40±0,21	15,70±1,57	3,53±0,63
	3	37,78±6,73	3,90±0,29	73,23±4,68	3,34±0,39	1,20±0,05	11,27±2,12	2,29±1,07

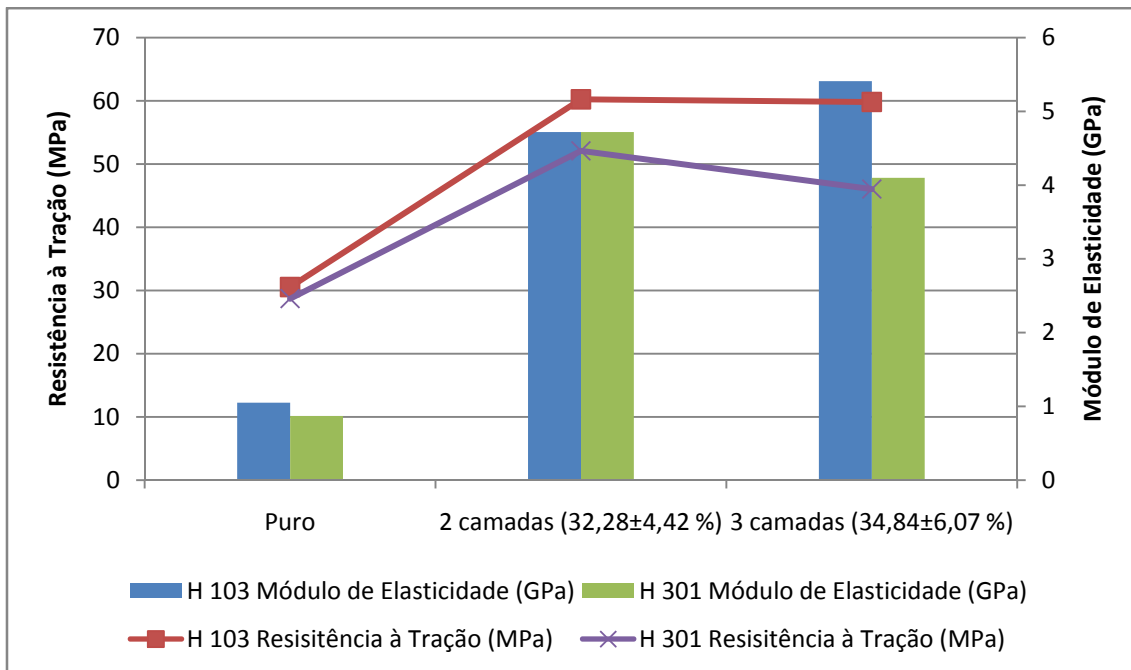
7.3.1 Influência do Teor de Fibra

Os dados reportados na Tabela 13 e ilustrados na Figura 26 indicam que o módulo elástico e a resistência à tração dos compósitos aumentam significativamente com a incorporação de fibras, em comparação com a matriz, quando as mesmas são alinhadas axialmente ao esforço. Verificam-se aumentos de no mínimo 264% no módulo elástico, obtido para o compósito com uma lamina (menor teor de fibra) produzido com fio 10/2 e o PP H103, e máxima de 515%, para aquele produzido com o PP H103 e com três laminas com fio 10/1. Observa-se ainda que há uma predominância, dos maiores

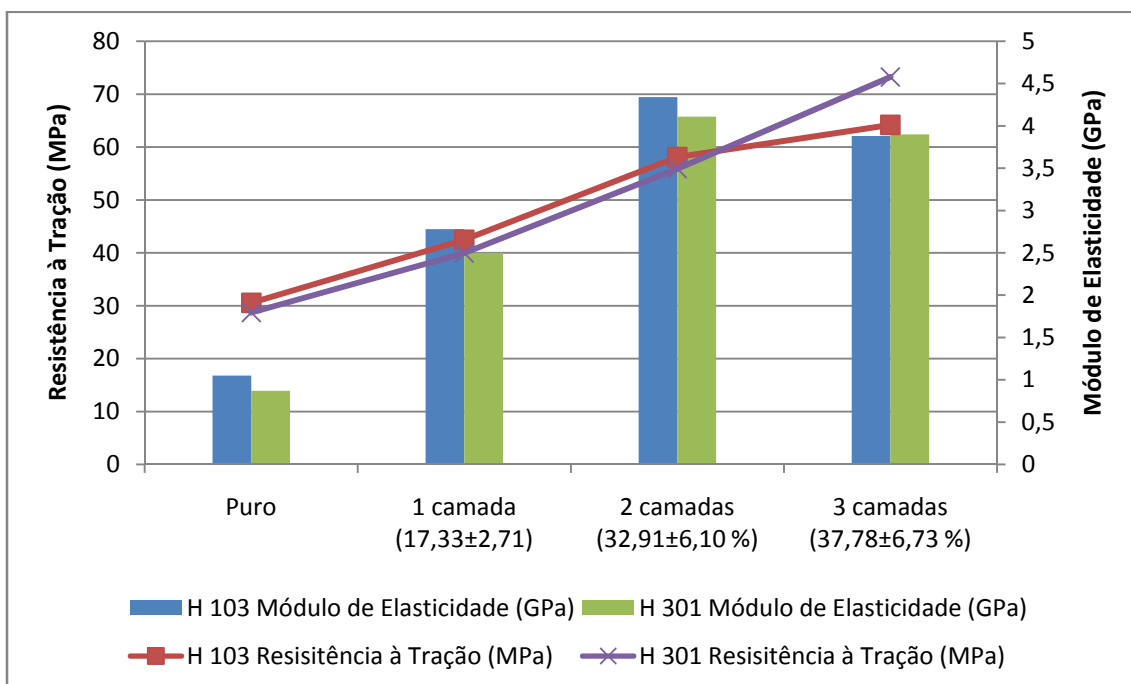
valores de módulo elástico que, ocorrem em compósitos com duas camadas de reforço, independente do tipo de fio de juta ou do índice de fluidez da matriz. Ganho semelhante acontece para a resistência à tração, sendo que para esta propriedade, tem-se um comportamento mais linear. Assim, a resistência aumenta com o teor de fibra, ou seja, os valores mais elevados para esta propriedade foram obtidos para os compósitos com três camadas de reforço. Em termos percentuais, em relação à matriz, a resistência à tração dos compósitos apresentou um acréscimo mínimo de 139% para os compósitos com uma única camada (tanto para o H103 como para o H301, com fio 10/2) e um acréscimo máximo de 254% para os compósitos reforçados com fio 10/2 e produzidos com três laminas e tendo por matriz o H301. Estes resultados eram os esperados, tendo em vista que as propriedades de compósitos reforçados por fibras longas, alinhadas e unidirecionais, testados na direção do reforço, são dominadas pelas fibras, que são mais rígidas e mais resistentes que a matriz.

Há uma tendência, relatada por KHONDKER et al., 2006., para compósitos utilizando como matriz o PLA e com fios contínuos e alinhados de juta, das propriedades mecânicas serem incrementadas com o aumento do teor de fibra, indo de 72 MPa para 78 MPa quando o teor de fibra passou de 22,5% para 38,0% (em peso), para estes mesmos teores, o módulo de elasticidade foi respectivamente, 7,5 GPa e 8,6 GPa. Os resultados obtidos neste estudo, apresentam este mesmo comportamento principalmente em relação a resistência à tração, inclusive com valores bem próximos. Já para o módulo de elasticidade, no estudo desenvolvido por KHONDKER et al., 2006, o crescimento do módulo de elasticidade não é tão expressivo, e em relação aos

resultados obtidos há uma queda para teores mais elevados de fibra (compósitos com três camadas). A explicação mais provável para esta ocorrência é de cunho prático. Com três camadas de fibra, é provável, que sob as condições experimentais adotadas e com o equipamento disponível, o processo de moldagem não tenha sido tão eficiente quanto para duas, provocando uma falha na intereção entre as camadas (Figura 26).



(a)



(b)

Figura 26 - Comportamento mecânico dos compósitos PP/fios de juta, em função do número de camadas de reforço (teor de fibra), na direção axial. (a) compósitos com fio 10/1; (b) compósitos com fio 10/2

Quanto ao alongamento, com fibras orientadas na direção do esforço, tem-se um decréscimo no alongamento dos compósitos, provocado pela baixa extensibilidade das fibras de juta (Figura 27). O alongamento normalmente decresce de uma para duas camadas e aumenta para três camadas.

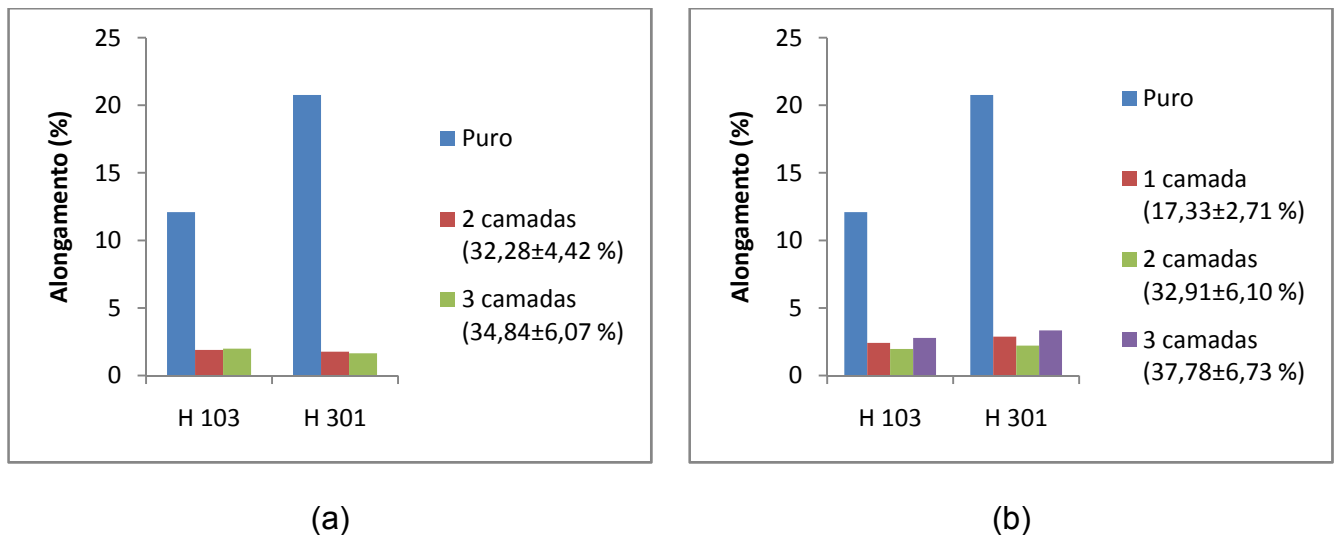
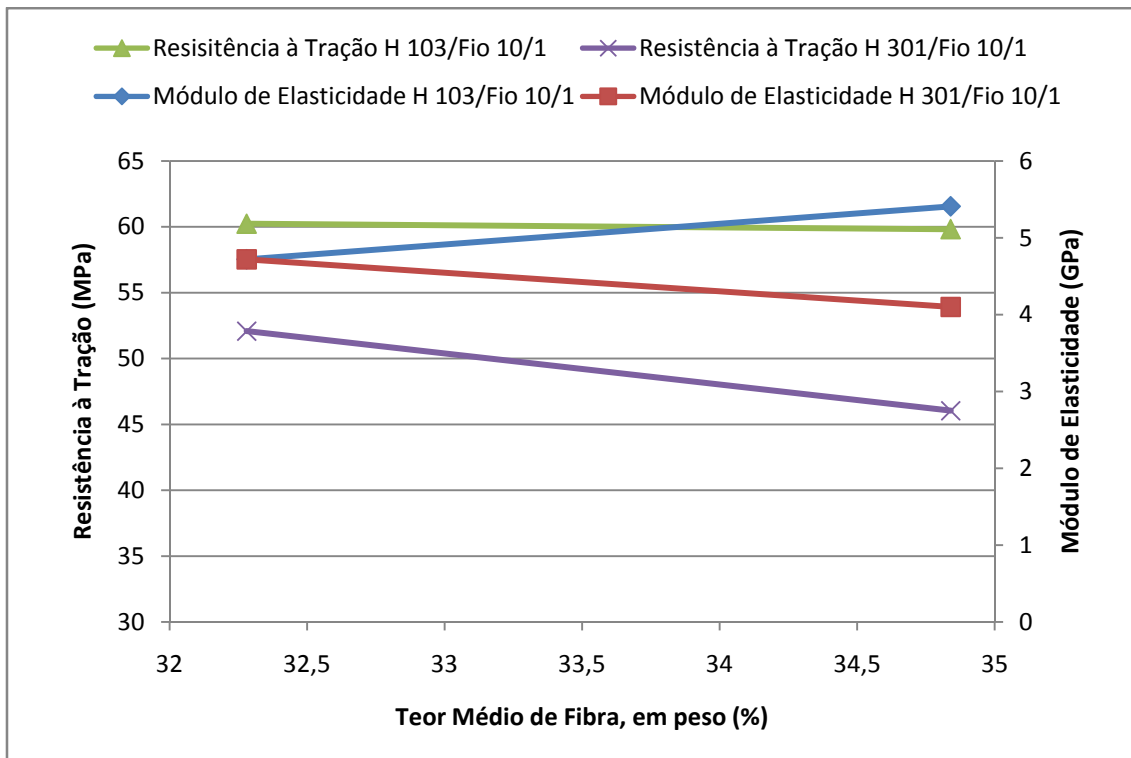


Figura 27 - - Comportamento mecânico dos compósitos PP/fios de juta, em função do número de camadas de reforço (teor de fibra), na direção axial. (a) compósitos com fio 10/1; (b) compósitos com fio 10/2

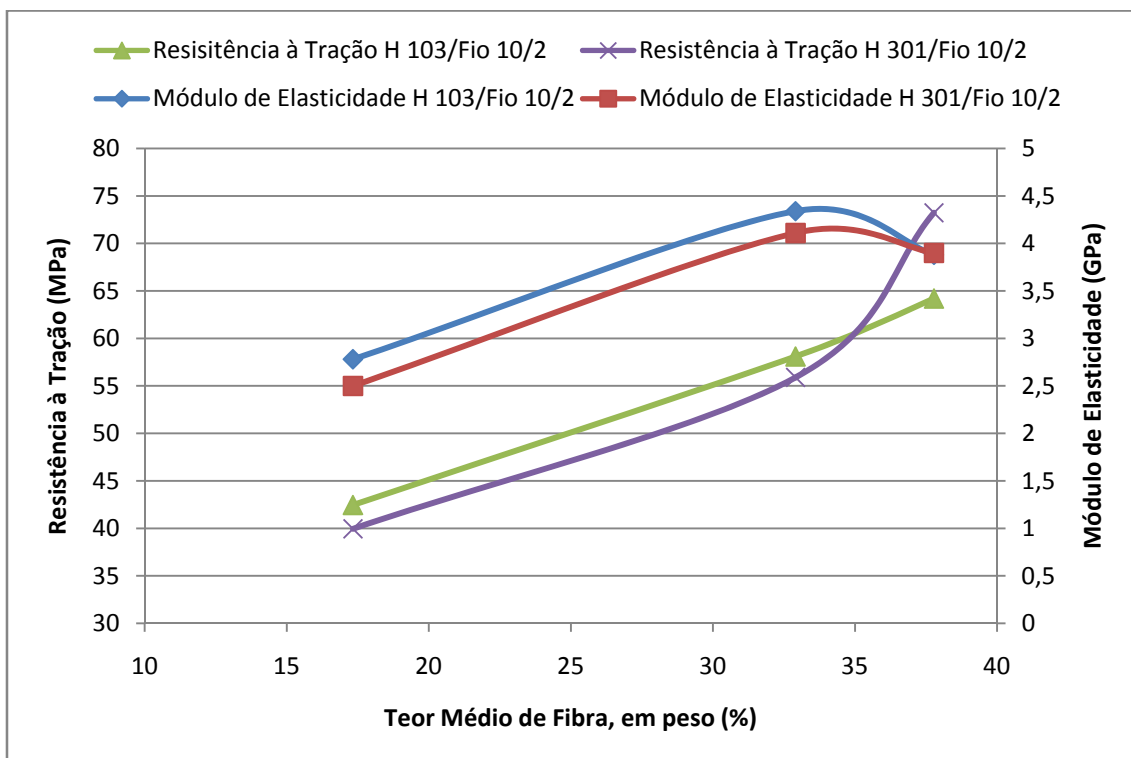
As propriedades na direção transversal serão discutidas posteriormente.

8.3.2 – Influência do Índice de Fluidez (MFI) – Tipo de Polipropileno

O índice de fluidez (MFI) é uma medida utilizada para se determinar o quanto um material polimérico flui quando se aplica a ele uma carga e temperatura. Esta medida está intimamente ligada ao peso molecular do polímero. Polímeros com maior índice de fluidez fluem mais facilmente do que os com um índice de fluidez menor. Neste estudo foram utilizados dois polipropilenos: um com índice de fluidez de 40 g/10min (H103) e outro com o índice de fluidez de 10 g/10min (H301). A eles foram adicionados fios alinhados e unidirecionais de juta. E os resultados mecânicos, obtidos com ensaio de tração, foram comparados (Figura 28).



(a)



(b)

Figura 28 - Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos em função de tipo de matriz utilizada: (a) compósitos feitos com fio 10/1, e (b) com 10/2

Os resultados demonstram que o polipropileno de maior índice de fluidez, apresenta maior rigidez e uma maior resistência à tração do que aquele de menor índice de fluidez, que, por sua vez, tem um maior alongamento. Estas características foram transferidas para os respectivos compósitos. Desta forma, falando-se numericamente, desprezando-se a influência do tipo de fio (Figura 28) observa-se que os compósitos que apresentaram melhores resultados médios, foram os produzidos com o H 103, com as fibras alinhadas axialmente ao esforço. Estes resultados se devem possivelmente a dois fatores: as melhores propriedades do polímero ou ao seu maior índice de fluidez. Um maior índice de fluidez, em tese, favorece um melhor molhamento das fibras, o que induz o compósito a ter melhores propriedades, pois a área de contato entre fibra e matriz aumenta.

No entanto, se for levado em consideração o ganho relativo quando da incorporação dos fios de juta, o H 301 foi o que teve maior ganho relativo (Tabela 14) em relação ao módulo elástico. Materiais menos rígidos tendem a ganhar mais com a incorporação de materiais mais rígidos (fibras de juta), o que está de acordo com os dados reportados na Tabela 14. O módulo elástico foi a propriedade que é mais beneficiada com a incorporação das fibras de juta.

8.3.3 – Influência do Tipo de Fio

Os fios de juta referência 10/1 e 10/2 foram ensaiados na mesma máquina que os compósitos e a mesma velocidade. Este ensaio foi realizado com o intuito de se ter uma noção do comportamento do fio quando submetido a um esforço trativo. Uma série de ressalvas devem ser feitas em relação aos resultados obtidos: 1) a medida do diâmetro do fio é uma aproximação (fio 10/1 aproximadamente 1 mm e o 10/2, 2 mm); 2) a máquina não possui garras

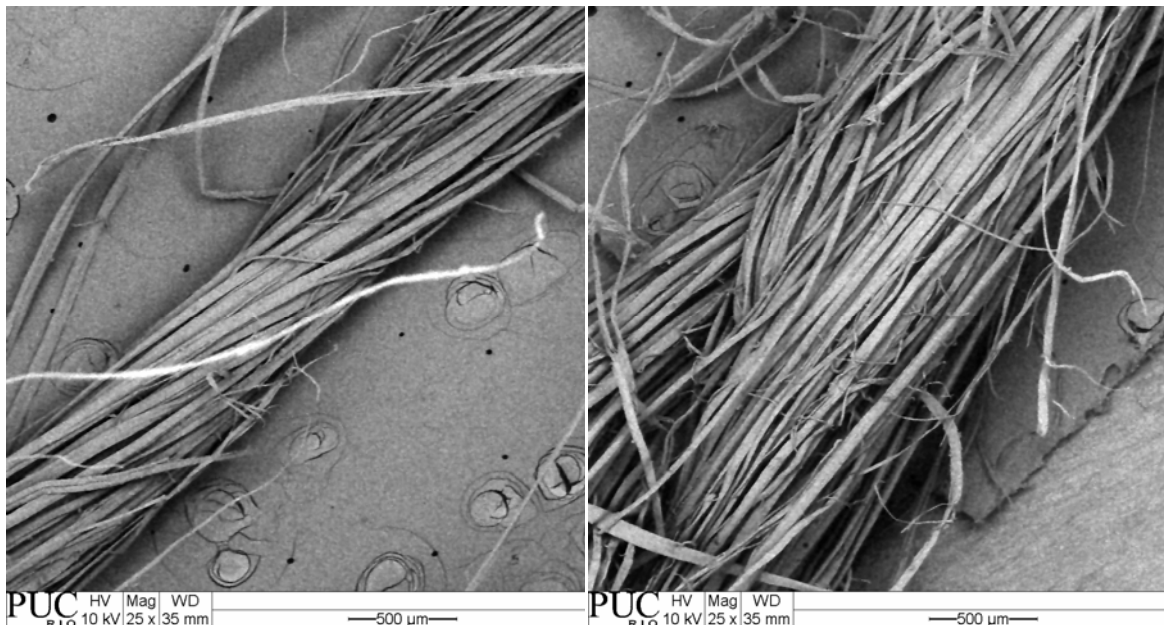
específicas para o ensaio de fios e 3) para tentar minimizar o erro foram realizados mais de 20 ensaios para cada fio. Os valores obtidos estão listados na Tabela 14. Para se calcular a tensão na ruptura para o fio 10/2, o qual é formado por duas pernas de fio 10/1, a área utilizada foi de duas vezes a área do fio 10/1.

Tabela 14 - Propriedades dos fios de juta

Tipo de fio	Carga na Ruptura (N)	Módulo Elástico (GPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação (%)
10/1	32,04±6,59	2,24±0,84	40,79±8,39	2,31±0,80
10/2	76,45±10,96	1,63±0,31	48,67±6,98	4,68±1,02

Dos resultados encontrados, percebe-se que o fio 10/2 suporta uma carga e tem uma deformação duas vezes maior que o fio 10/1, além de apresentar uma maior tensão na ruptura. Este por sua vez, apresentou um menor módulo de elasticidade, em relação ao fio 10/1. Estes resultados estão bem aquém daqueles calculados teoricamente (ver pg. 98) e são bem inferiores aos dos citados na literatura (Tabela 3). Este comportamento pode estar associado à forma como os fios (cordões) são produzidos, que é pela torcedura de várias fibras, e se o fio for formado por mais de uma perna, então se faz uma nova torcedura agora envolvendo os cordões. Desta forma durante, durante a medida do módulo de elasticidade, em baixas deformações, tem-se possivelmente um alinhamento dos fios (isto é, os fios que estavam torcidos tendem a se alinhar ou pelo menos diminuir o ângulo de torcedura), desta forma os valores do módulo de elasticidade tendem a ser baixos. Em relação à resistência à tração, com o comprimento útil do fio utilizado (60 mm), é provável que durante o ensaio haja um escorregamento de alguns fios em relação aos

outros e isto pode provocar uma redução no valor desta propriedade. Comportamento similar este é reportado por MADSEN (2004)



(a)

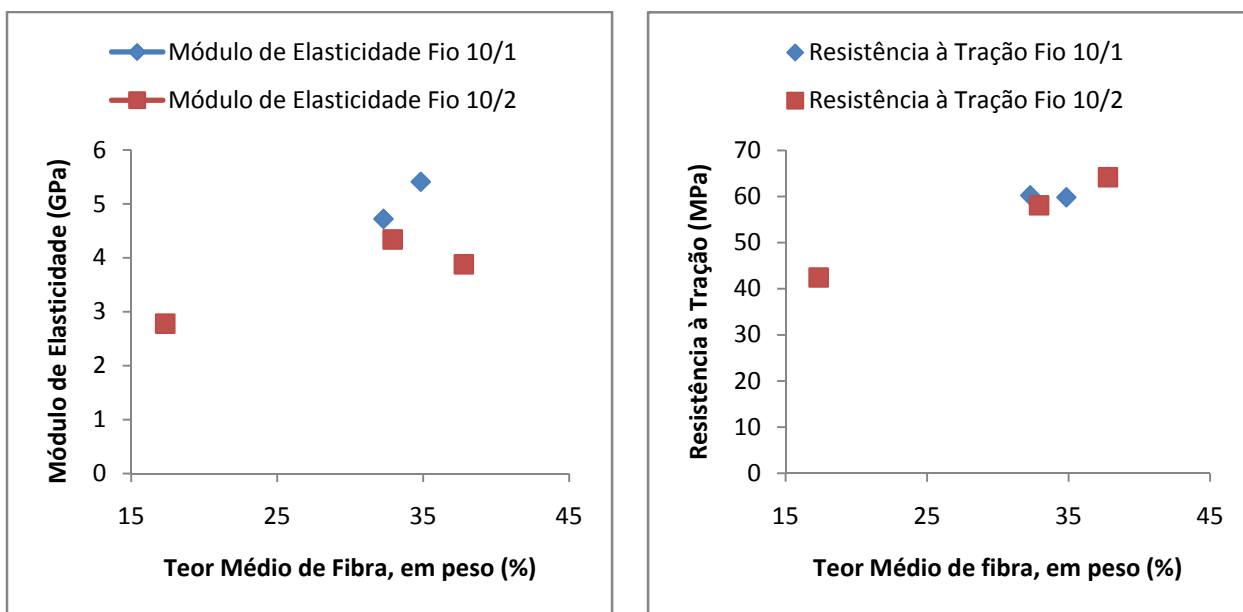
(b)

Figura 29 - Micrografias dos fios 10/1 (a) e 10/2 (b)

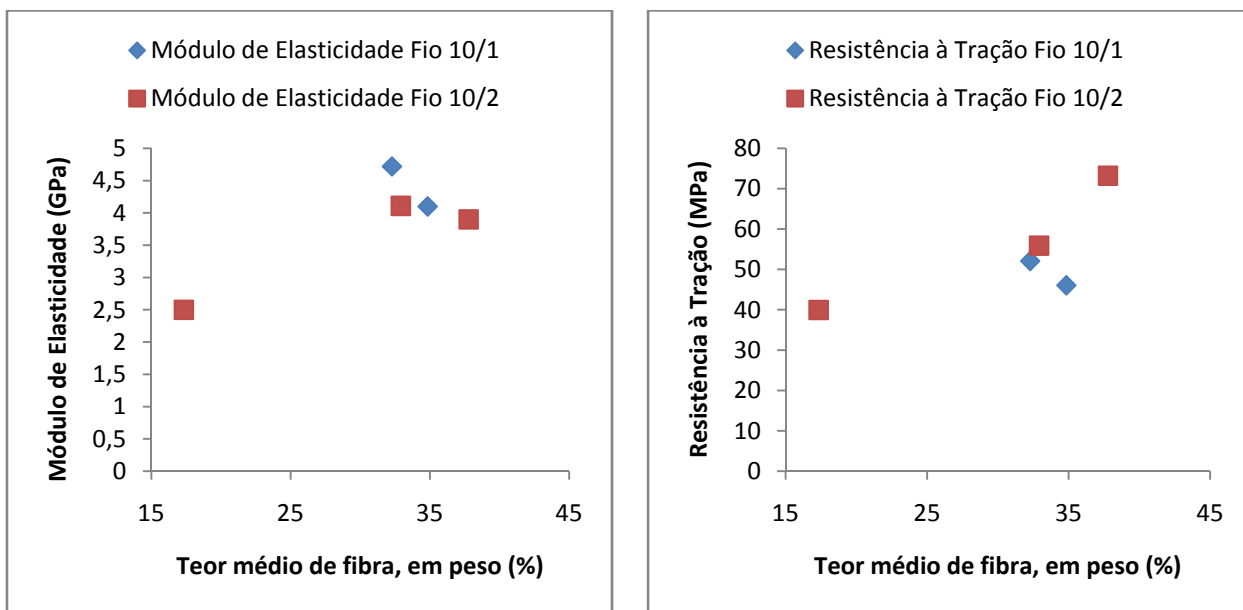
Ao se analisar estas micrografias (Figura 29 (a) e (b)), observa-se que o fio 10/1, por ser formado apenas por uma perna, tende a ser mais “organizado” do que o 10/2. Esta “organização” pode facilitar o recobrimento dos fios pela matriz, coisa que para o fio 10/2 torna-se mais difícil, devido às duas pernas do fio estarem bem próximas dificultando a penetração da matriz nestas regiões de contato. Isto, somado ao maior número de imperfeições deste fio em relação ao 10/1, pode levar os compósitos produzidos com o fio 10/2 apresentar propriedades mecânicas um pouco inferiores em relação aos compósitos produzidos com fio 10/1.

Analisando a influência dos fios nas propriedades dos compósitos, deixando de lado a influencia da matriz, podemos observar (Figura 30) que os compósitos feitos com o fio 10/1, apresentam módulo elástico ligeiramente

superior aos produzidos com fio 10/2 e resistência à tração similar. Este comportamento pode estar ligado ao que foi dito anteriormente.



(a)



(b)

Figura 30 - Propriedades mecânicas dos compósitos em função do tipo de fio: (a) compósitos com PP H 103 e, (b) PP H 301

Ao se correlacionar o índice de fluidez da matriz com o diâmetro das fibras de reforço utilizadas, observa-se que o comportamento é o mesmo

descrito anteriormente. Compósitos manufacturados com o PP H103 e com fio 10/1 têm um melhor comportamento mecânico, em tração, do que os produzidos com o PP H301, o que é atribuído a uma conjugação favorável, ou seja, fibras com menos defeitos e um polímero que escoar mais facilmente.

8.3.4 Influência da direção de ensaio

Foram realizados ensaios na direção axial e transversal as fibras para todos os compósitos. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 13. Verifica-se que, para os compósitos, com fibras alinhadas perpendicularmente ao esforço, ocorre um decréscimo, tanto no módulo elástico quanto na resistência à tração, e um aumento no alongamento em relação aos de composição similar com as fibras alinhadas axialmente em todos os casos. Nesta direção (transversal) tem-se uma predominância das propriedades da matriz sobre as propriedades do compósito. Enquanto que na direção axial o predomínio é das fibras como esperado.

Mesmo não sendo a direção preferencial para atuação das fibras como reforço, verifica-se que há um crescimento no módulo elástico com o aumento do teor de fibra, exceção feita apenas ao compósito que tem por matriz o PP H 301 (tanto com fio 10/1 como com o 10/2) e tendo um teor de fibra acima de 34% (ou três camadas). Em todos os casos, o módulo na direção transversal, dos compósitos foram superiores aos das suas respectivas matrizes, fato este provocado pela maior rigidez da fibra de juta em relação a matriz.

A resistência à tração diminui com o aumento do teor de fibra. Como as fibras estão alinhadas perpendicularmente ao esforço, estas agem como descontinuidades na matriz, fazendo com que a resistência à tração diminua. A

maior queda foi apresentada pelos compósitos com a matriz PP H 103, isto é, a de maior índice de fluidez (menor massa molar), tanto para aqueles com fio 10/1 quanto com o 10/2.

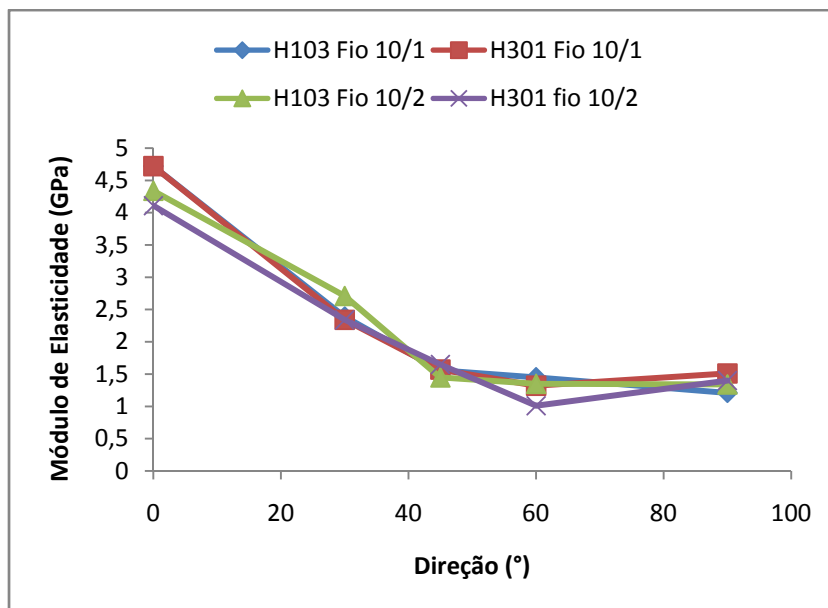
Para o alongamento, tal como para a resistência a tração, observa-se uma tendência de queda com o aumento do teor de fibra. Como estas funcionam como defeitos fazem com que a deformação seja menos pronunciada.

Além da direção axial e transversal foram realizados ensaios nos compósitos, com duas camadas, com teor médio de fibra de $34,00 \pm 5,03\%$ (em peso), com as fibras alinhadas a 30, 45 e 60°, em relação ao esforço. Os valores obtidos são reportados na Tabela 15 e Figura 31.

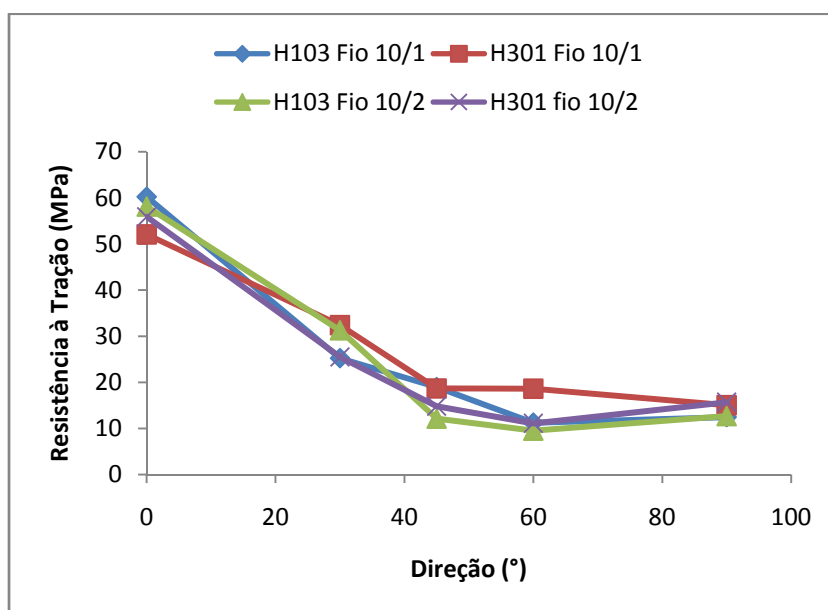
Tabela 15 - Propriedades mecânicas dos compósitos em diferentes direções

Propriedades	Compósitos	Direção das Fibras (°)				
		0	30	45	60	90
Módulo de Elasticidade (GPa)	H 103 Fio 10/1	4,72±0,22	2,39±0,19	1,56±0,27	1,45±0,11	1,21±0,25
	H 301 Fio 10/1	4,72±0,22	2,34±0,24	1,57±0,08	1,32±0,10	1,51±0,20
	H 103 Fio 10/2	4,34±0,35	2,71±0,15	1,45±0,14	1,35±0,19	1,34±0,08
	H 301 Fio 10/2	4,11±0,16	2,34±0,39	1,65±0,49	1,01±0,03	1,40±0,21
Resistência à Tração (MPa)	H 103 Fio 10/1	60,24±4,07	25,23±2,45	18,97±1,02	11,25±0,88	12,47±0,63
	H 301 Fio 10/1	52,08±3,14	32,40±1,33	18,67±0,59	18,61±1,10	15,04±1,00
	H 103 Fio 10/2	58,10±3,49	31,29±3,21	12,14±1,86	9,53±0,34	12,70±2,37
	H 301 Fio 10/2	55,90±4,21	25,50±1,36	14,81±4,72	11,11±0,48	15,70±1,57

Percebe-se que há uma tendência de queda no módulo de elasticidade e na resistência à tração, indo, normalmente, de um valor máximo em 0° (onde a força é aplicada paralelamente as fibras) a um valor mínimo em 90° , onde a força é aplicada perpendicularmente as fibras. Para os ângulos diferentes de 0° , o comportamento mecânico torna-se um pouco mais complexo, pois a força aplicada ao compósito, além da tensão normal, gera tensões de cisalhamento. E, considerando que em compósitos de matriz polimérica as propriedades mecânicas em cisalhamento são controladas pela matriz, a qual possui propriedades inferiores a das fibras. Sendo assim, é natural que haja um decréscimo nas propriedades analisadas quando se modifica a orientação das fibras em um compósito.



(a)



(b)

Figura 31 - Propriedades mecânicas dos compósitos em função da direção da fibra: (a) módulo de elasticidade e, (b) resistência à tração

8.3.5 Influência da secagem prévia das fibras

Nesta etapa foi realizada a secagem prévia das fibras antes da confecção das lâminas, que por sua vez formam os compósitos. Foram feitos apenas ensaios em compósitos com duas camadas de reforço, pois foram estes que apresentaram melhores propriedades nas etapas anteriores. Os resultados obtidos são sumarizados na Tabela 16.

Verifica-se através da Tabela 16 e Figura 32, que a secagem prévia das fibras provocou um aumento relativamente grande nos valores da resistência à tração, enquanto que o módulo de elasticidade se manteve praticamente nos mesmos patamares. O módulo de elasticidade, como era de se esperar, é pouco influenciado por tratamentos físicos, já a resistência à tração tende a ser mais sensível a estes tratamentos. Pois, normalmente, tem-se uma melhora da interface quando se faz a secagem das fibras (ver próxima seção), fazendo com que as propriedades em tração aumentem.

Tabela 16 - Comparação entre os compósitos produzidos com e sem secagem prévia das fibras

PP	Teor de fibra médio, em peso (%)	Sem secagem prévia			Com secagem prévia		
		E(GPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	E(GPa)	σ (MPa)	ϵ (%)
H 103	-	1,05±0,08	30,54±1,42	12,09±4,09	1,05±0,08	30,54±1,42	12,09±4,09
H 301	-	0,87±0,04	28,70±0,85	20,76±3,60	0,87±0,04	28,70±0,85	20,76±3,60
Fio 10/1							
H 103 (MFI = 40g/10mim)	35,13±4,33	4,53±0,64	56,12±3,67	1,87±0,54	5,17±0,35	80,91±3,57	2,30±0,24
H 301 (MFI = 10g/10mim)		4,93±0,19	49,62±3,68	1,82±0,43	4,63±0,31	62,74±9,42	2,16±0,49
Fio 10/2							
H 103 (MFI = 40g/10mim)	39,34±0,32	4,89±0,32	51,35±3,86	1,52±0,17	5,14±0,93	77,29±7,44	2,81±0,99
H 301 (MFI = 10g/10mim)		4,79±0,16	57,38±5,05	1,88±0,11	6,35±0,48	72,40±7,15	1,65±0,13

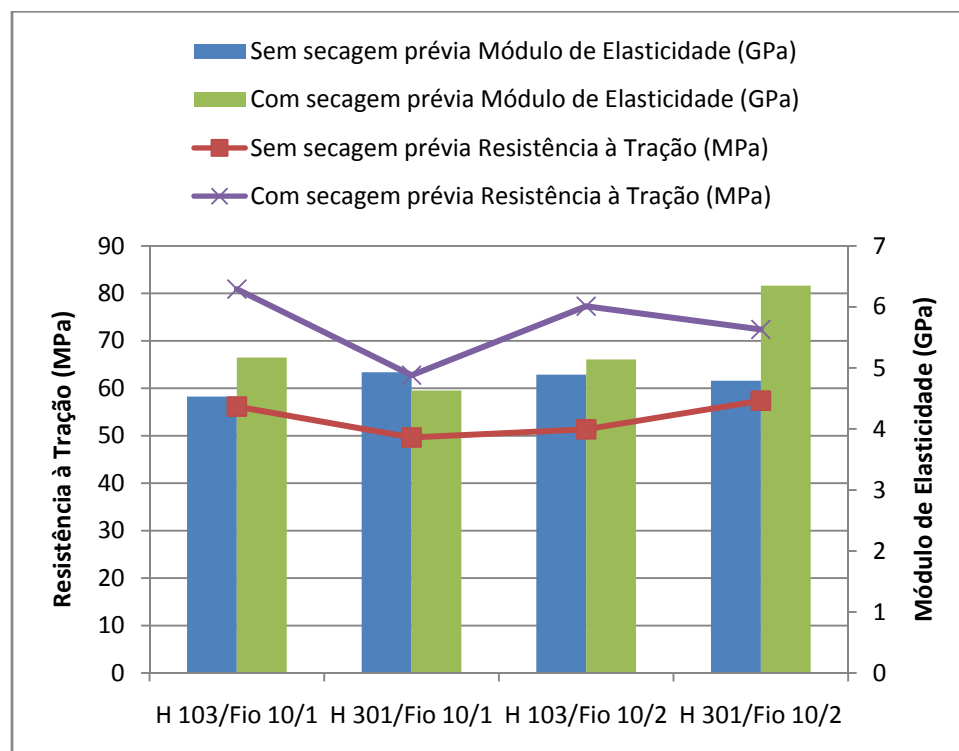


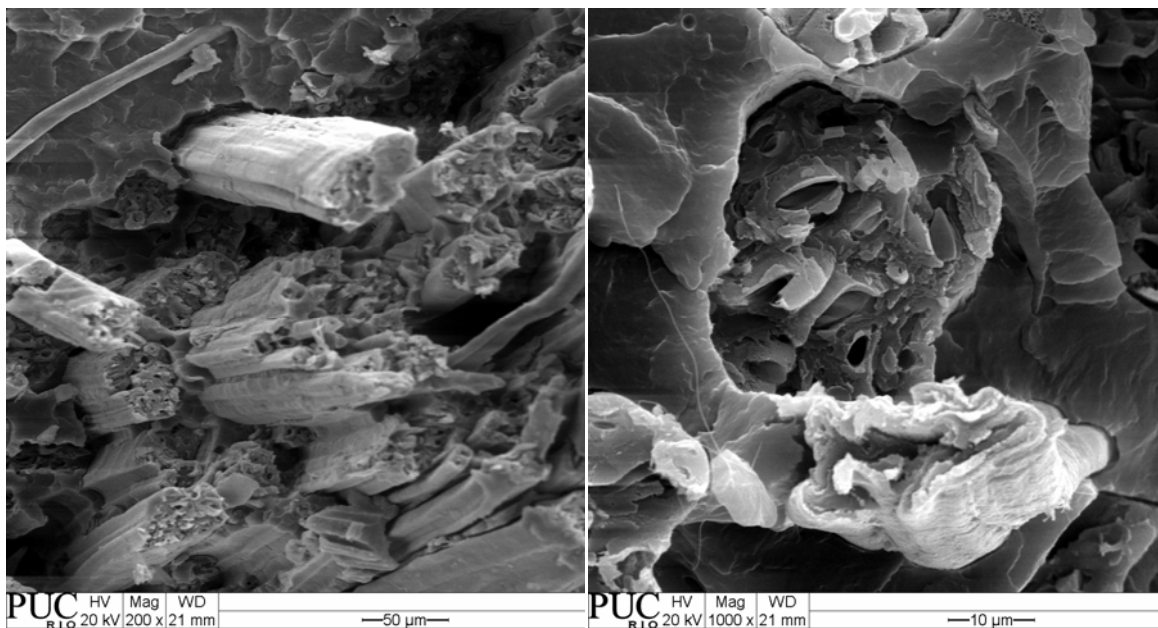
Figura 32 - Propriedades mecânicas dos compósitos com e sem secagem prévia das fibras

8.5.5 Análise Micrográfica

Foi realizada análise micrográfica das superfícies de fratura dos compósitos com fio 10/2, com e sem secagem prévia das fibras. As micrografias obtidas são mostradas e discutidas adiante. Entretanto, pode-se adiantar que todos os compósitos em estudo possuem uma estrutura não homogênea, caracterizada por duas regiões distintas, uma rica em fibra e outra contendo apenas a matriz.

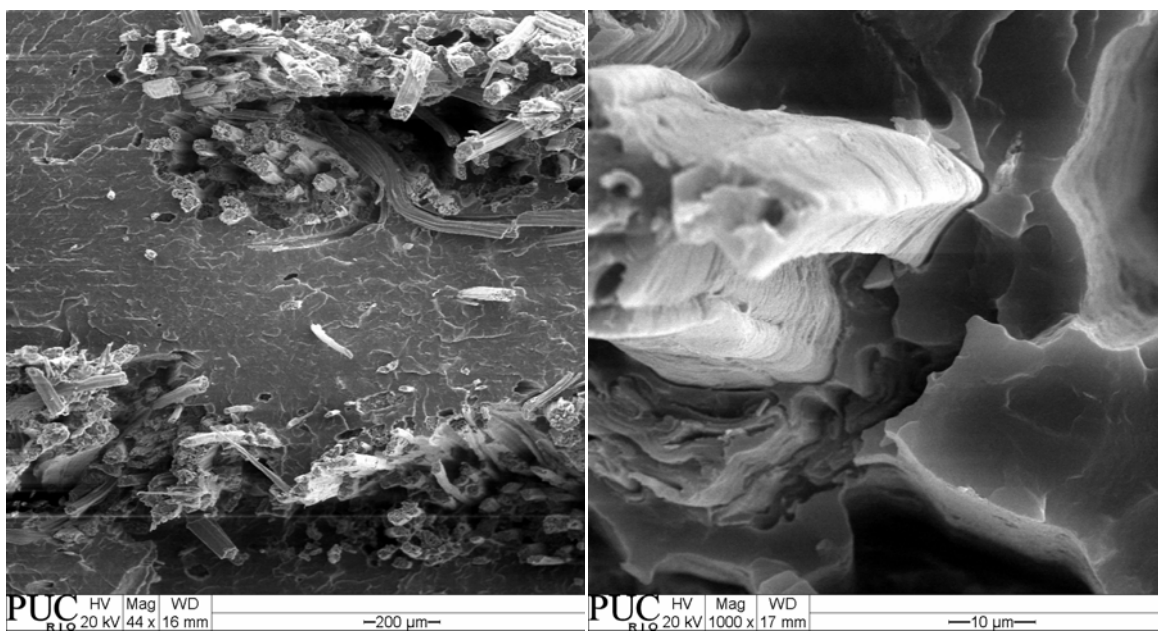
8.5.5.1 Influencia do Índice de Fluidez

Nas Figuras 33 (a), (b), (c) e (d), são apresentadas as micrografias para os compósitos com PP H 103 e PP H 301, com duas camadas de fibra. Nelas pode-se observar que os compósitos produzidos com o polipropileno de maior índice de fluidez (H 103), aparentemente apresentam uma boa adesão, nas fibras externas aos fios. À medida que a fratura vai entrando na mecha de fios, o comprimento das fibras fora do plano da fratura aumenta (Figura 33 (a)), até que existem grandes comprimentos sacados. Em alguns casos foi possível observar matriz nos centros dos fios, Figura 33 (b), sendo que nestes casos podem-se ver fibras rompidas próximo ao plano da fratura. Com o PP H 301, tem-se a mesma estrutura não homogênea, e com as fibras da periferia dos fios com menor comprimento de saca-fibra (Figura 33 (c)). Além disto, algumas amostras apresentam fios completamente arrancados e fibras soltas provenientes desses fios arrancados e interfaces abertas (Figura 33 (d)). Portanto, tem-se um indício para a comprovação das melhores propriedades apresentadas pelos compósitos com PP H103 em relação ao PP H 301, ou seja, a melhor interface obtida por polímeros com maior índice de fluidez.



(a)

(b)



(c)

(d)

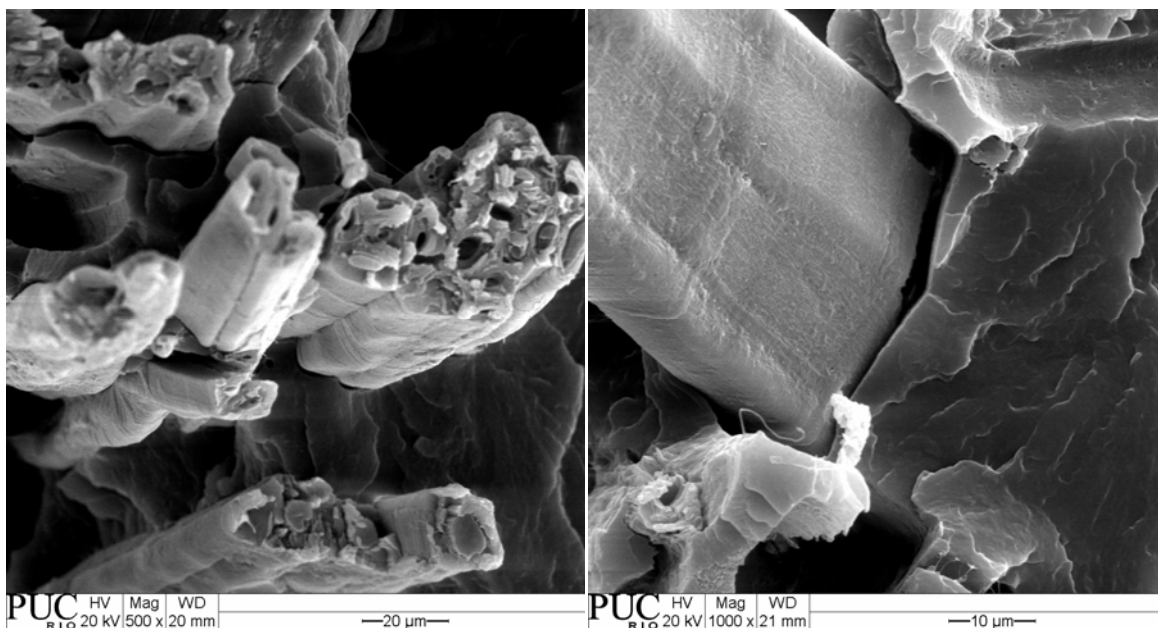
Figura 33 - Micrografias da superfície de fratura dos compósitos: PP H 103 (a) e (b); e, PP H 301 (c) e (d), com duas camadas de fio 10/2

8.5.5.2 Influência da secagem prévia das fibras

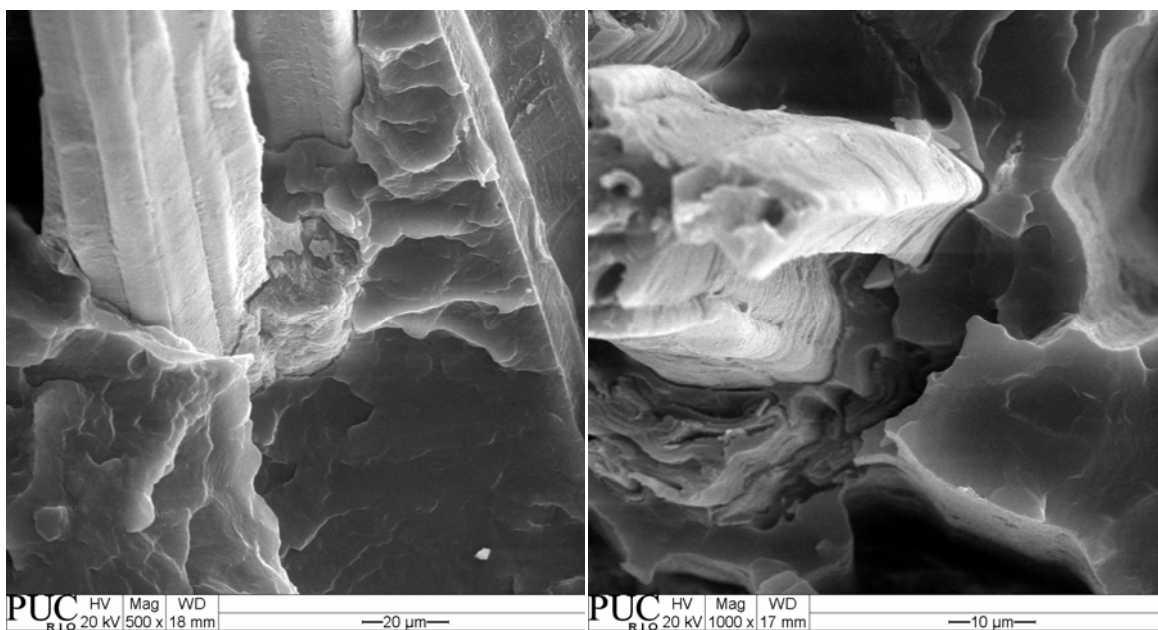
As fraturas dos compósitos com e sem secagem da fibra, não apresentam grandes diferenças. A única diferença relevante é que tanto para os compósitos produzidos com o PP H 103 e com PP H 301 mostram uma sutil melhora na interface com a secagem prévia da fibra, sendo mais evidente para os compósitos com PP H 103 (Figura 34). Para os compósitos produzidos com PP H 301, a interface que era aberta nos compósitos sem secagem prévia teve uma melhora em algumas regiões de contato entre a fibra e a matriz. Este fato vem comprovar os melhores resultados mecânicos obtidos pelos compósitos com secagem prévia da fibra, principalmente em resistência à tração.

Sem secagem

Com secagem



Compósitos com PP H 103



Compósitos com PP H 301

Figura 34 - Micrografias dos compósitos com duas camadas de fios de juta referencia 10/2, com e sem secagem prévia das fibras

8.3.6 Análise Teórica dos Resultados

8.3.6.1 – Regra das Misturas e Regra das Misturas Inversa

Para se utilizar as Equações 3 e 4 (pg. 56 e 57), é necessário que se conheça a fração volumétrica de fibra (V_F) e o módulo elástico da fibra (E_F). O primeiro pode ser calculado facilmente utilizando-se a densidade da fibra (aproximadamente $1,3 \text{ g/cm}^3$) e a densidade da matriz, $0,905 \text{ g/cm}^3$ (como mostrado em anexo).

O módulo elástico dos fios de juta, por sua vez, é determinado de forma indireta, utilizando para isto os resultados experimentais de tração uniaxial. Na Figura 35, tem-se o comportamento idealizado de um compósito, onde o crescimento do módulo elástico em função do teor de fibra é linear na direção axial. Desta forma, o menor valor de módulo ocorre quando não se tem fibra, ou seja, tem-se apenas a matriz, e o valor máximo é atingido quando se tem apenas fibra (ou 100% de fibra). Neste caso, utilizou-se os valores experimentais para plotar um gráfico do módulo elástico em função do teor de fibra, extrapolando-o até o valor de 100% de fibra. O mesmo procedimento é feito para o cálculo da resistência à tração. Estes gráficos (Figura 36) são plotados em função do teor de fibra, sendo utilizados neste caso todos os resultados obtidos nos ensaios de tração, posteriormente aplica-se uma linha de tendência linear, obtendo-se uma equação. Com estas equações e fazendo $x=1$, encontra-se o valor do módulo de elasticidade e da resistência à tração para os fios de juta (10/1 e 10/2).

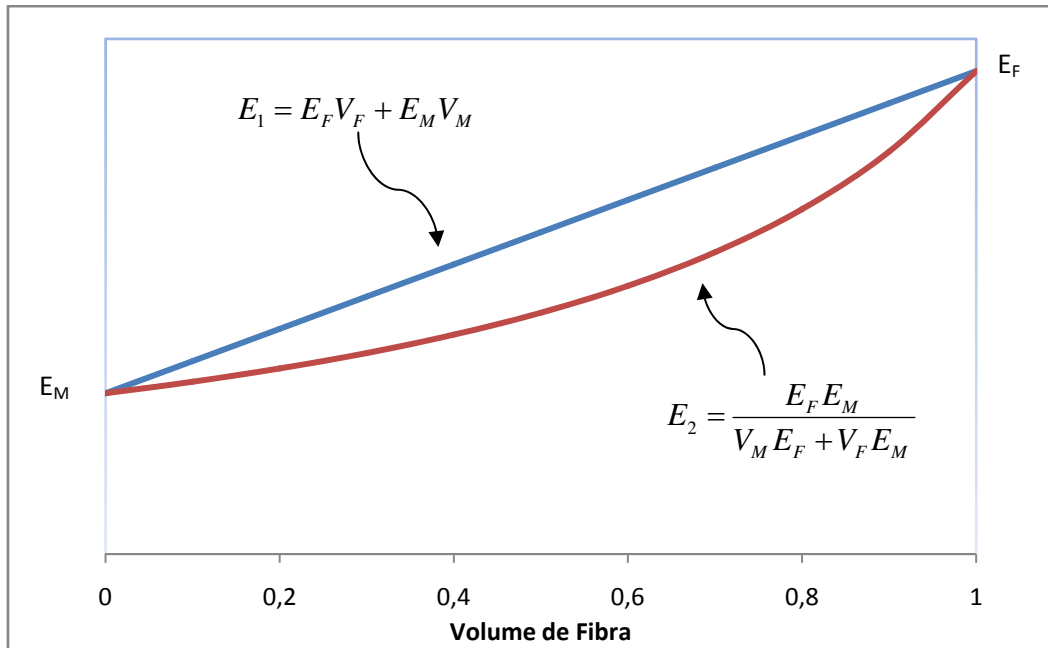
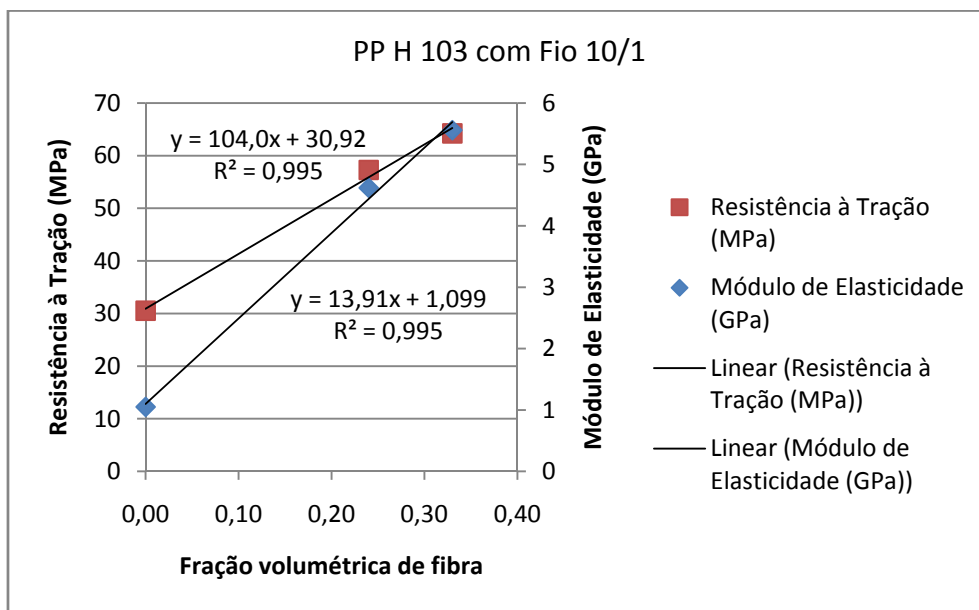
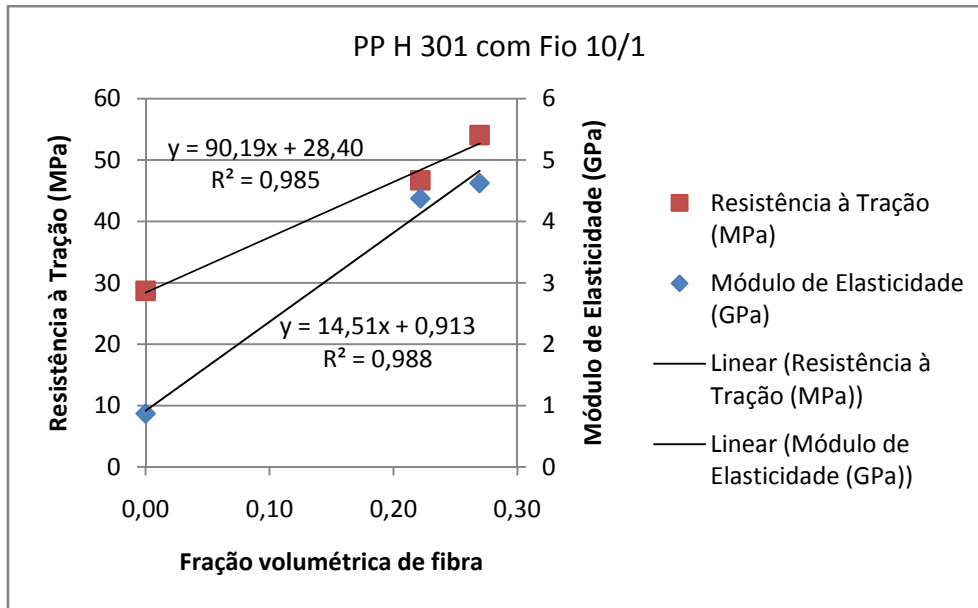


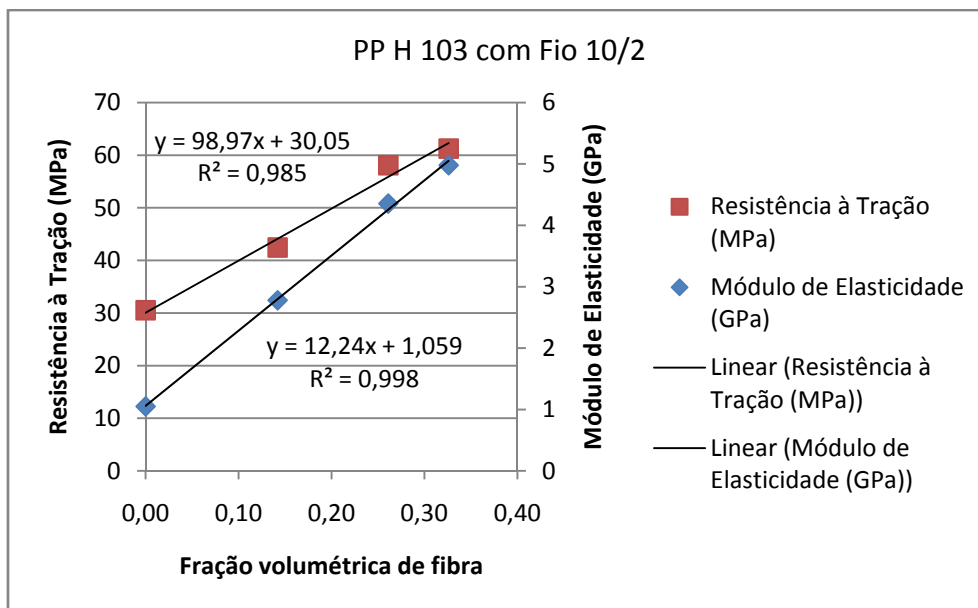
Figura 35 - Comportamento idealizado do módulo elástico em função do volume de fibra em um compósito



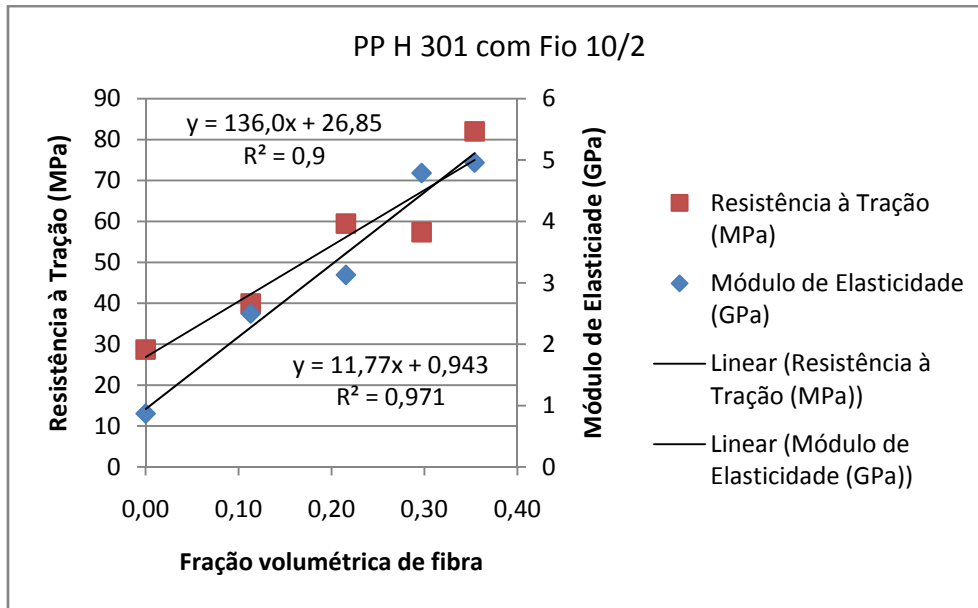
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 36 - Análise gráfica para se determinar o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos fios de juta: (a) fio 10/1 e PP H 103; (b) fio 10/1 e PP H 301; (c) fio 10/2 e PP H 103; e, (d) fio 10/2 e PP H301

Como as características dos fios de juta são as mesmas, independente do tipo de matriz em que estejam inseridas, pode-se juntar os valores obtidos em função do tipo de fio utilizado (Tabela 17)

Tabela 17 - Estimativa do módulo elasticidade e da resistência à tração para os fios 10/1 e 10/2, baseado em valores médios

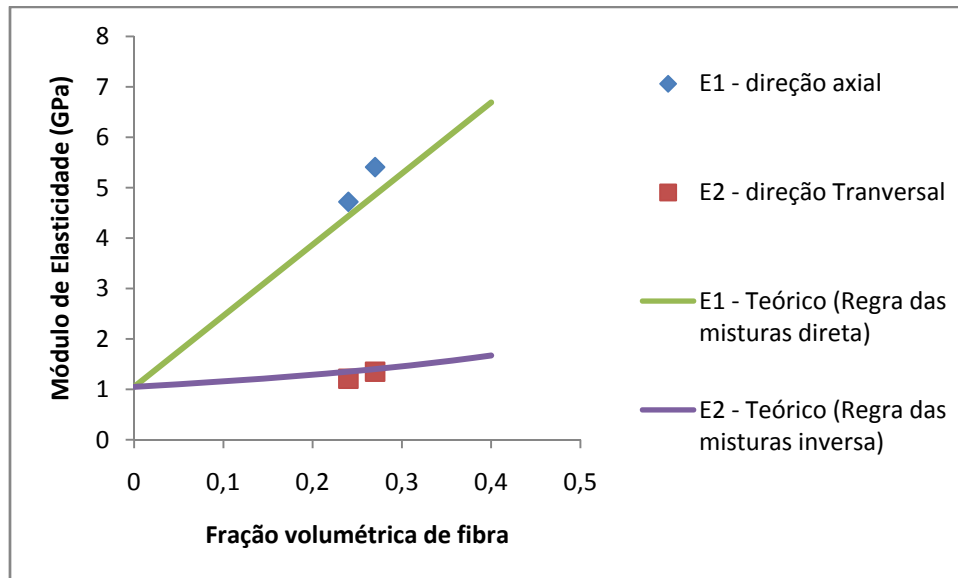
	Equações	x = 1	Valores médios
Fio 10/1	$E = 13,91x + 1,099$	15,01	E=15,22 GPa
	$E = 14,51x + 0,913$	15,42	
	$\sigma = 104,0x + 30,92$	134,92	$\sigma = 126,76$ MPa
	$\sigma = 90,19x + 28,40$	118,59	
Fio 10/2	$E = 12,24x + 1,059$	13,30	E= 13,01 GPa
	$E = 11,77x + 0,943$	12,71	
	$\sigma = 98,97x + 30,05$	129,02	$\sigma = 145,94$ MPa
	$\sigma = 136,0x + 26,85$	162,85	

Estes valores são bem superiores aos obtidos experimentalmente, entretanto as tendências mostradas pelos fios foram confirmadas pelos compósitos, ou seja, o fio 10/1 que apresentou maior módulo elástico naquela oportunidade repetiu o comportamento. E o fio 10/2, que suportou uma maior carga, apresentou uma maior resistência à tração. Não há uma explicação para este comportamento, MADSEN (2004), relata que os fios de cânhamo com uma duas pernas apresentaram valores de módulo de elasticidade entre 7 e 13 GPa (o menor valor apresentado pelo fio com duas pernas) e resistência à tração entre 580 – 660 MPa. Já quando estes fios foram incorporados a matriz de PET, com um teor de aproximadamente 30% (em volume), os valores de módulo de elasticidade e resistência à tração passaram respectivamente para: 16 – 20 GPa e 187 – 221 MPa.

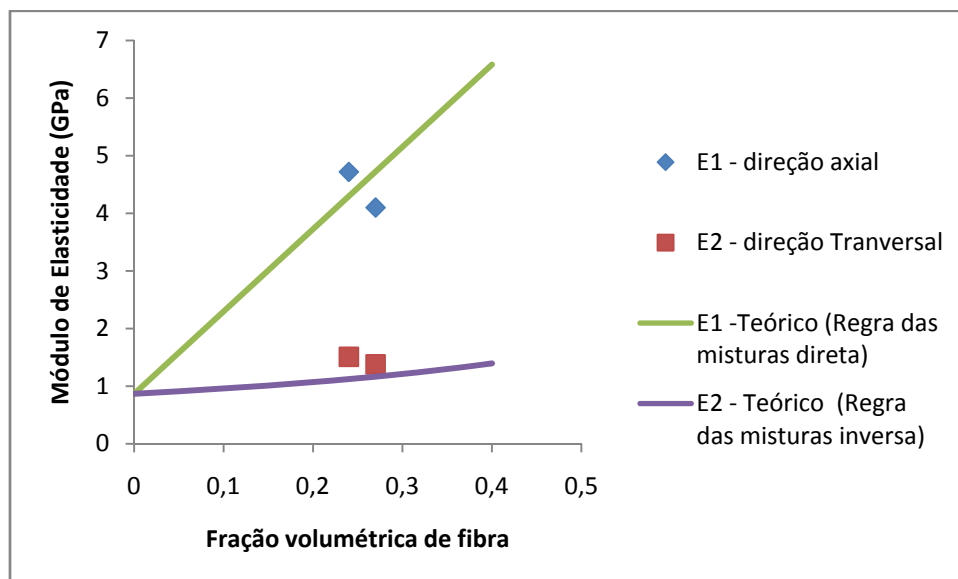
Os valores teóricos estão bem próximos dos valores citados na literatura. GOWDA *et al* (1999), reporta valores de resistência à tração para fios de juta em torno de 130 MPa e para tecidos tramados em torno de 80 MPa. Em relação ao módulo de elasticidade, não existem muitos trabalhos que relatem os valores desta propriedade para os fios de juta. Entretanto, para a fibra simples (sem ser tecida) o módulo elástico varia entre 25 e 55 GPa (CICHOCKI Jr. & THOMASON, 2002). Para outros fios, como os de cânhamo, o módulo de elasticidade está em torno de 18 GPa e a resistência à tração é de aproximadamente 200 MPa (MADSEN, 2004).

Com base nos dados calculados, módulo elástico e resistência à tração, para as fibras, e utilizando a regra das misturas direta e inversa, pode-se comparar os valores teóricos com os experimentais. Para isto são utilizados os

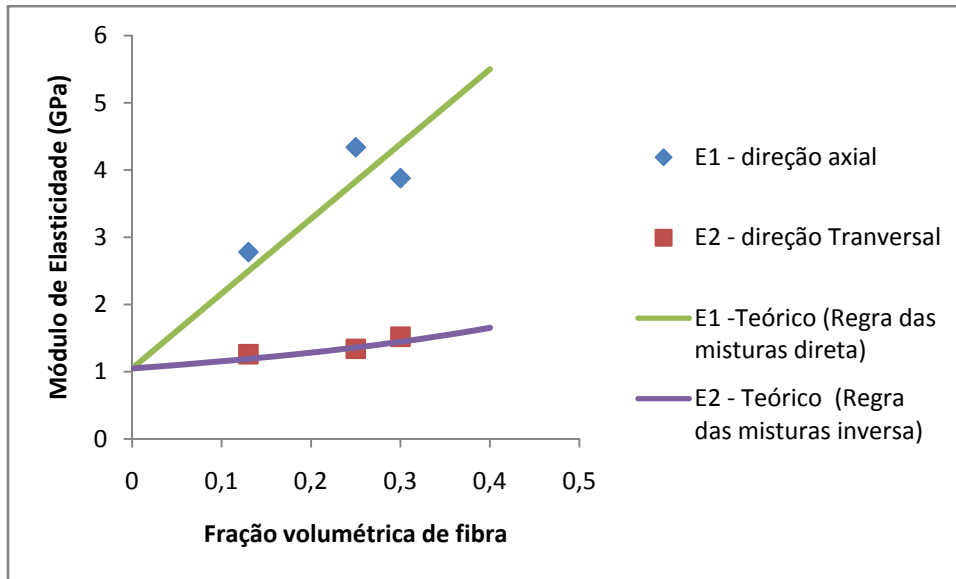
dados contidos na Tabela 13. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 37.



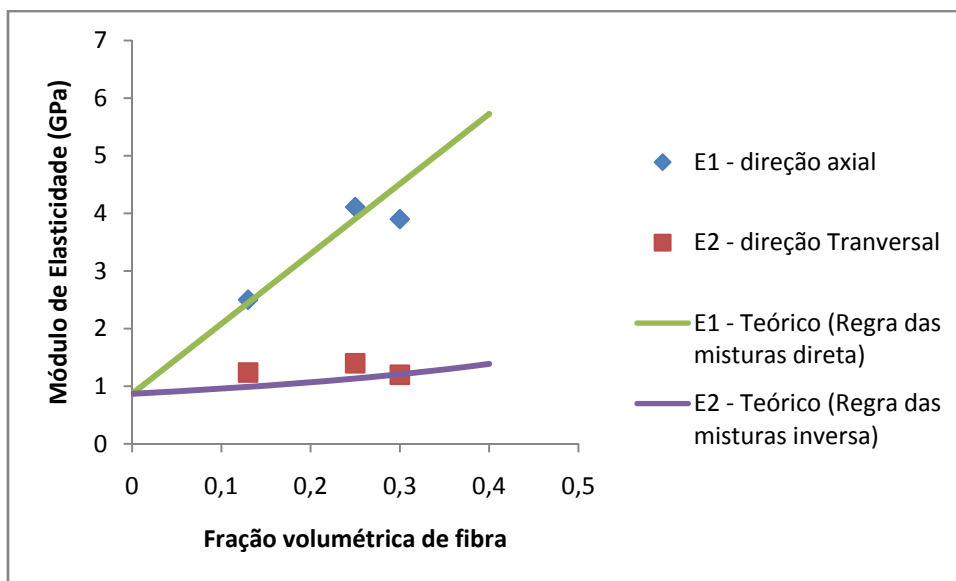
(a)



(b)



(c)



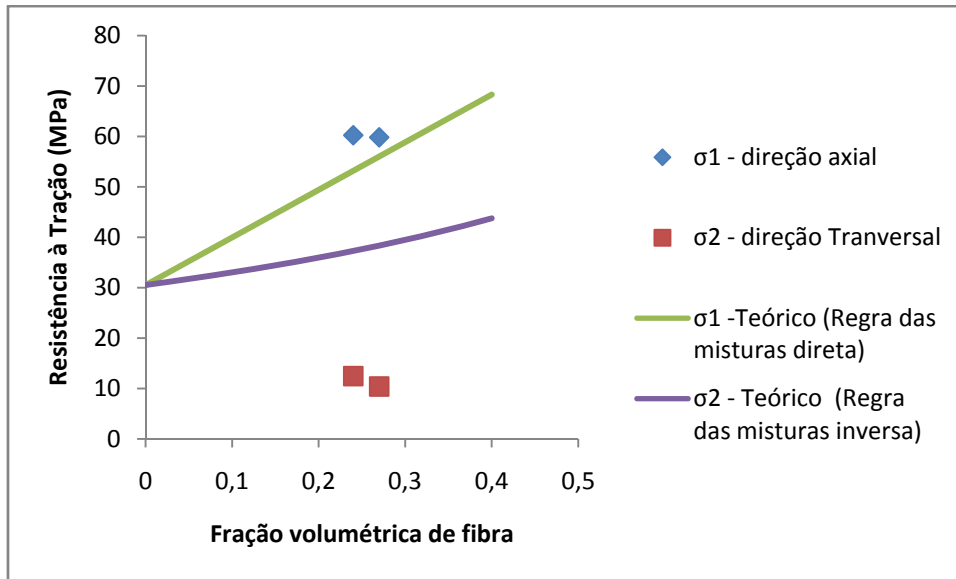
(d)

Figura 37 - Comparação entre os módulos de elasticidade, experimental e teórico: (a) H 103 e fio 10/1; (b) H 301 e fio 10/1; (c) H 103 e fio 10/2; e, (d) H 301 e fio 10/2

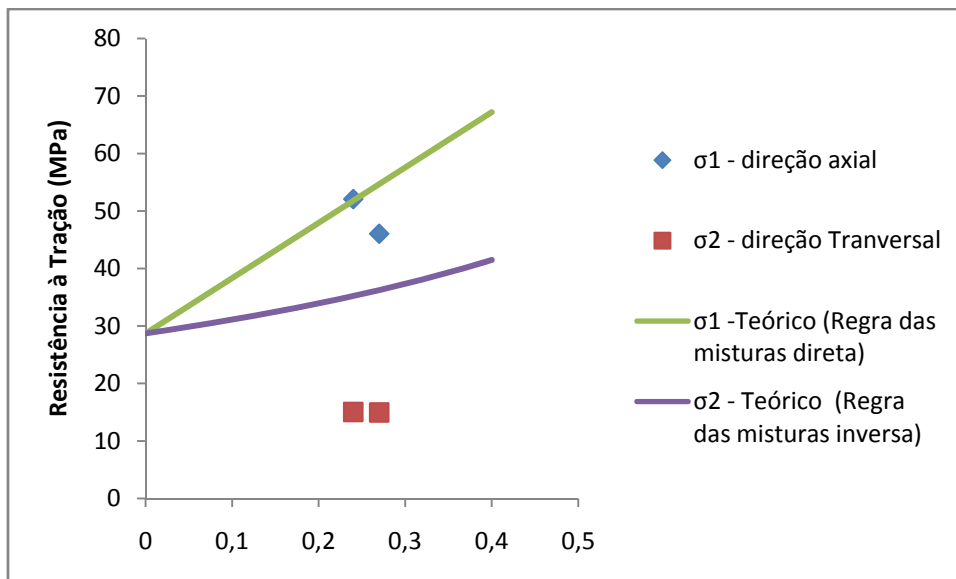
Para o módulo elástico, a regra das misturas direta e inversa, fornece uma boa aproximação em relação aos valores experimentais. Normalmente para a direção transversal, a regra das misturas não apresenta bons

resultados, entretanto para os compósitos em estudo este comportamento não se repetiu. Este bom ajuste na direção transversal pode ser uma característica dos compósitos com fibra natural, pois MADSEN, 2004, relata este comportamento para compósitos com matriz de PET reforçados por fios de cânhamo. Este bom ajuste não é observado quando se utiliza fibras sintéticas. Já na direção axial um bom ajuste já era esperado, tendo-se em vista que os módulos de elasticidade teóricos foram calculados por ela. Este bom ajuste se deve ao fato de que as medidas do módulo de elasticidade ocorrem a baixas deformações, onde a influência das falhas na interface sobre as propriedades mecânicas não são tão pronunciadas.

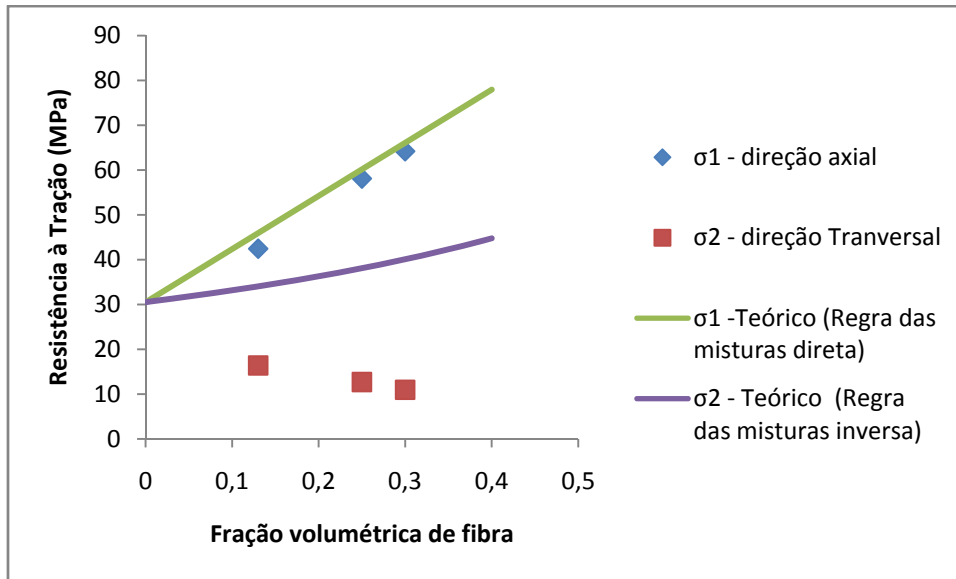
O mesmo procedimento (equações 3 e 4, substituindo-se, E_1 por σ_1 e E_2 por σ_2) utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade é utilizado para se determinar os valores da resistência à tração dos compósitos (Figura 38).



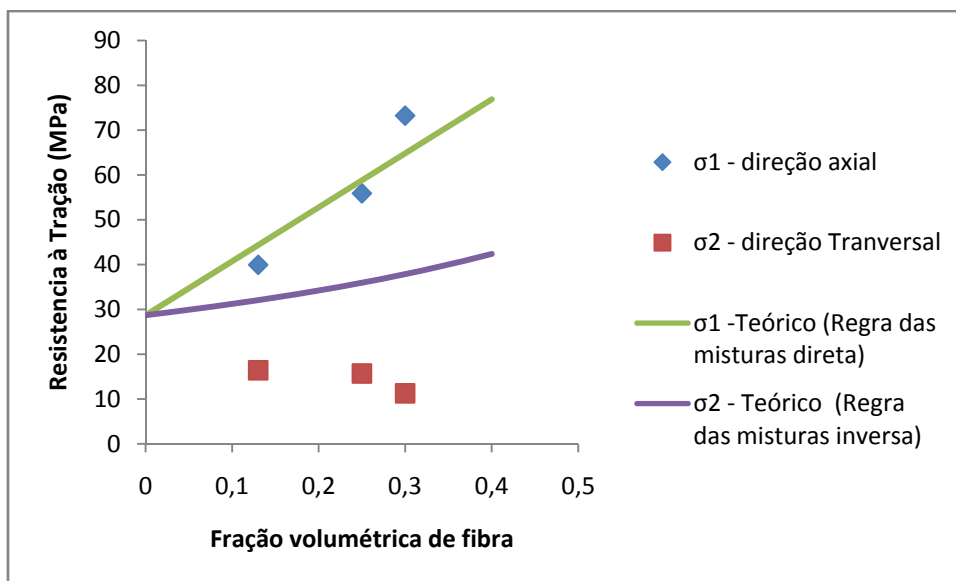
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 38 - Comparação entre as resistências à tração, experimental e teórica: (a) H 103 e fio 10/1; (b) H 301 e fio 10/1; (c) H 103 e fio 10/2; e, (d) H 301 e fio 10/2

Para a resistência à tração, entretanto, não se obteve um ajuste tão bom quanto para o módulo de elasticidade. A melhor aproximação ocorreu para os compósitos com os fios de juta alinhados na direção axial. Para a direção

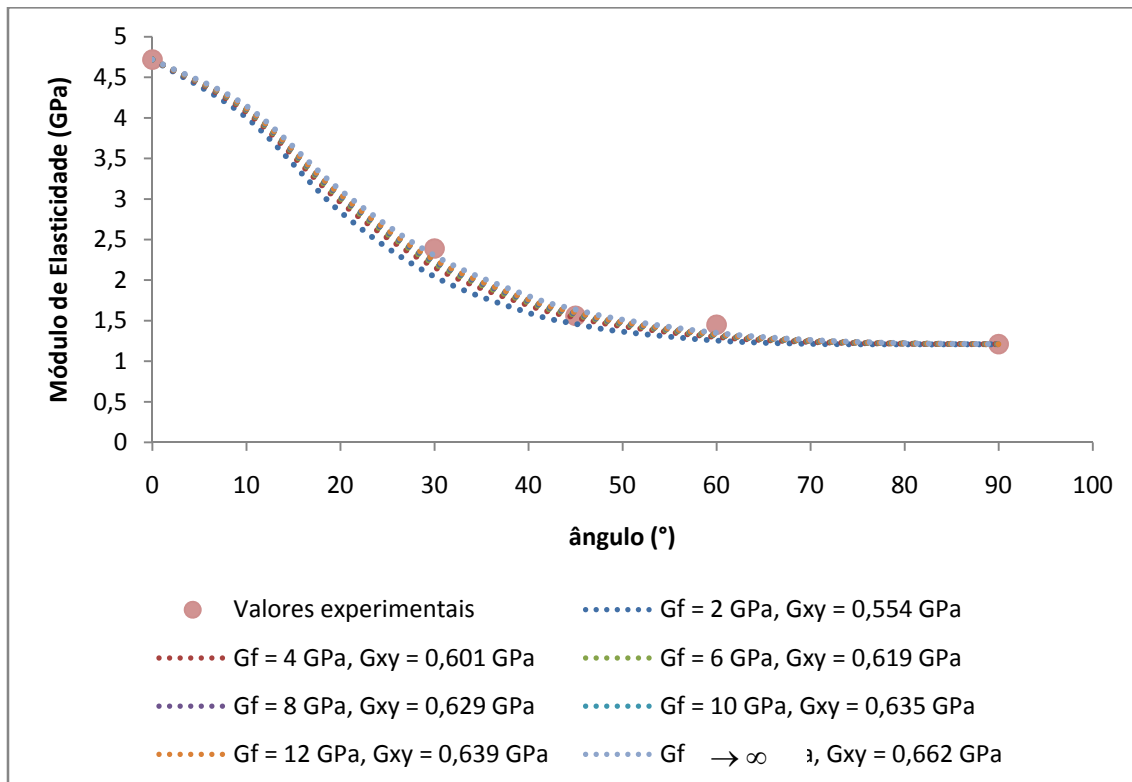
transversal, os valores experimentais foram bem inferiores aos valores teóricos, o que pode estar ligado ao fato de que nesta direção tem-se uma predominância maior das propriedades da matriz, e que qualquer imperfeição na mesma tende a diminuir estes valores, como é o caso das fibras alinhadas perpendicularmente ao esforço.

8.3.6.2 – Propriedades em função do ângulo de ensaio – Determinação do módulo e da tensão de cisalhamento do compósito

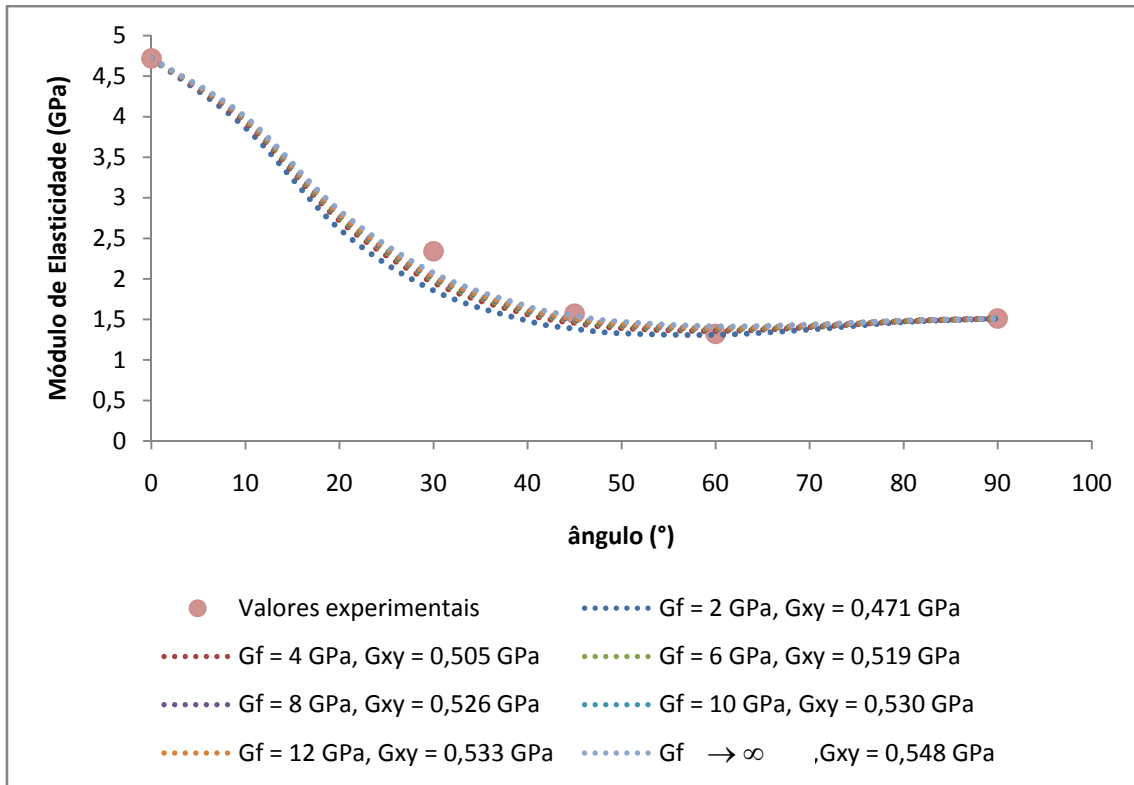
A maioria dos trabalhos sobre as propriedades tênsis de compósitos reforçados por fibras naturais são baseados em ensaios na direção axial (direção das fibras). Entretanto caso estes compósitos sejam utilizados em aplicações mais sofisticadas se faz necessário o conhecimento de todas as suas propriedades, incluindo aí as propriedades de cisalhamento, que são conhecidas (ou determinadas) através de ensaios específicos ou através de equações matemáticas.

Para tanto se determinou o comportamento teórico do módulo de elasticidade em função do ângulo das fibras, a partir necessárias algumas considerações: (i) o coeficiente de Poisson do polipropileno foi estipulado em 0,35 (HULL & CLYNE, 1996); (ii) que o coeficiente de Poisson do compósito é menor que o coeficiente da matriz em torno de 0,1 (CICHOCKI Jr. & THOMASON, 2002), e (iii) que o coeficiente de Poisson do compósito não se altera com o aumento do teor de fibra. Após estas considerações, calcula-se o módulo de cisalhamento da matriz (G_m) através da equação 7 (pg. 58) com base nos dados experimentais. Substitui-se o valor de G_m na equação equação 6 (pg. 57), deixando o módulo de cisalhamento do compósito (G_{xy}) em função do módulo de cisalhamento da fibra (G_f). O resultado da equação 6 é então

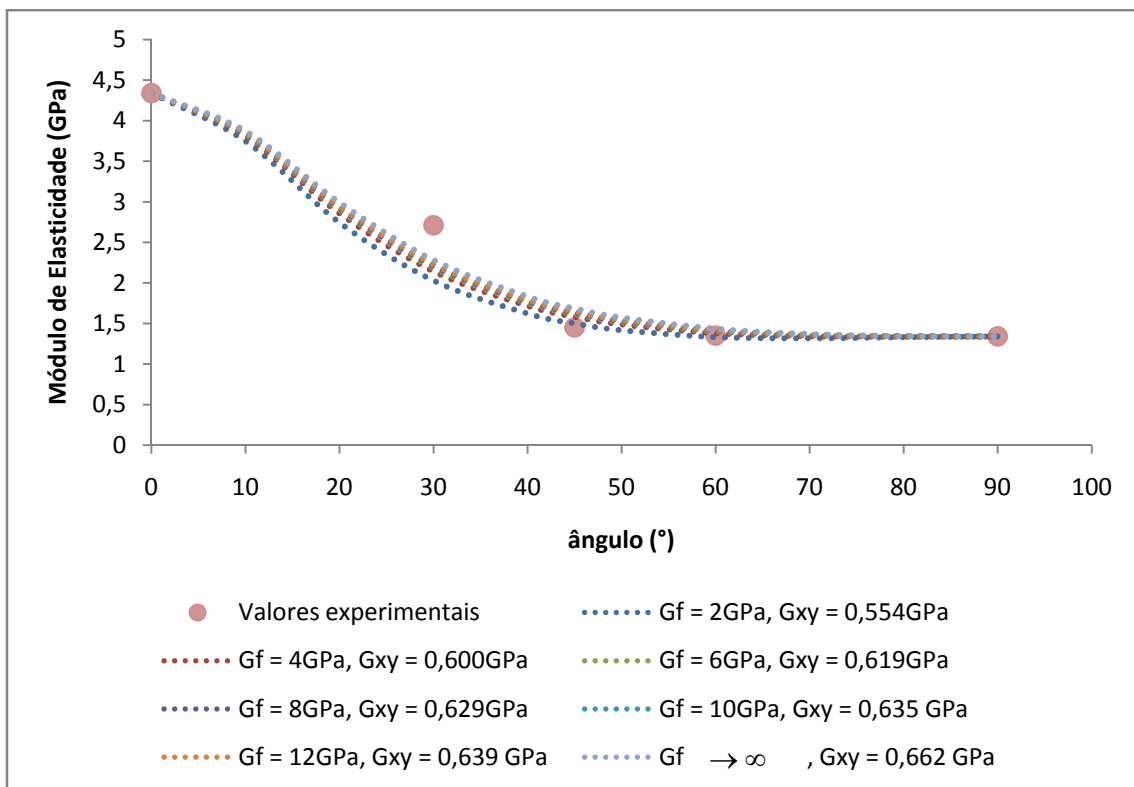
substituído na equação 5 (pg. 57). Onde se tem os valores do módulo de elasticidade, nos diversos ângulos, em função dos valores experimentais na direção axial (E_x) e transversal (E_y) e, do módulo de cisalhamento da fibra de juta. Assim atribuindo-se valores para G_f de 2GPa até infinito é possível se determinara o comportamento do módulo de elasticidade em função da angulação das fibras, bem como se estimar os valores para o módulo de cisalhamento da fibra de juta e do compósito em função da aproximação com os valores experimentais. Os resultados obtidos são apresentados em forma de gráficos na Figura 36.



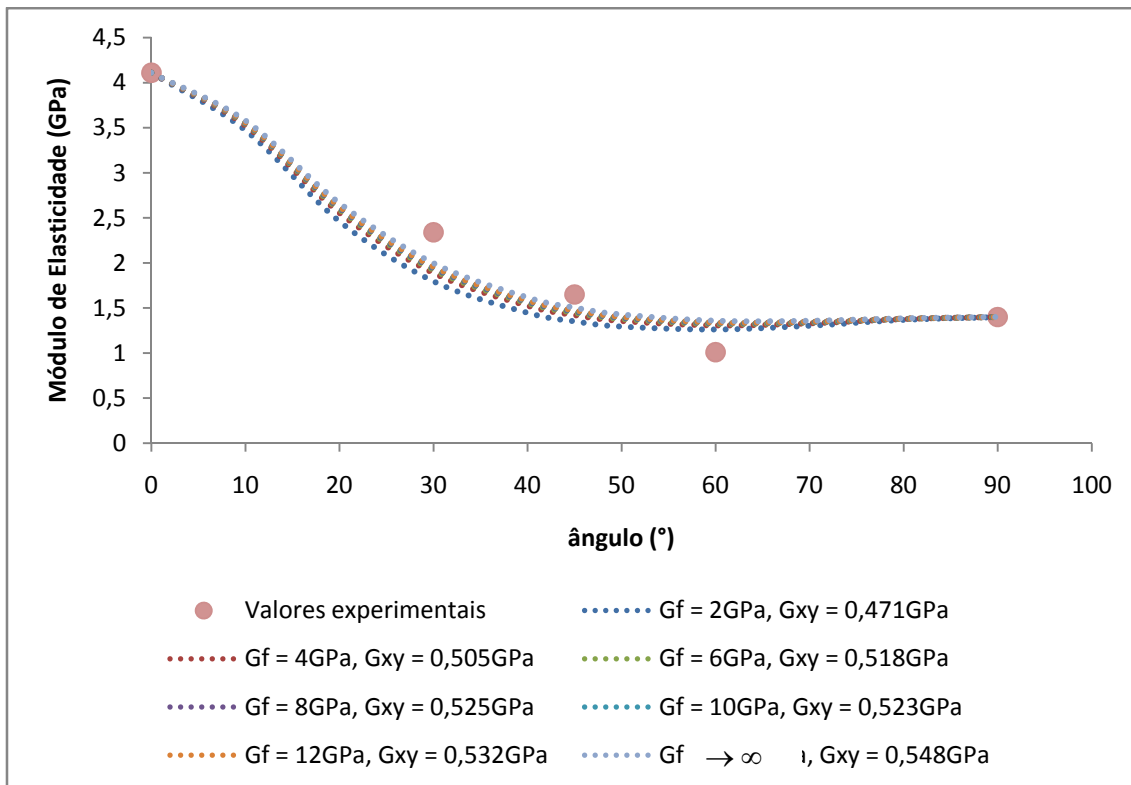
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 39 - Predição teórica do módulo de elasticidade dos compósitos: a) H 103 e fio 10/1; b) H 301 e fio 10/1; c) H 103 e fio 10/2; e, d) H 301 e fio 10/2

É possível observar na Figura 36, que o comportamento experimental do módulo de elasticidade, em função da direção da fibra, possui a mesma tendência que o teórico. Com isto é possível se obter valores para esta propriedade com apenas dois ensaios um na direção axial e outro na direção transversal, desde que se conheça o módulo de cisalhamento da fibra utilizada.

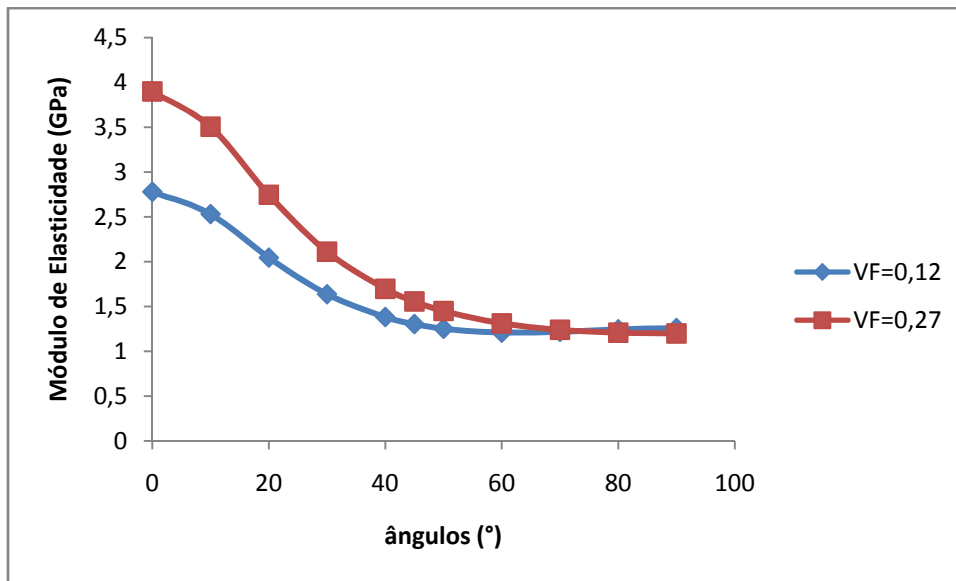
Para se determinar o módulo de cisalhamento da fibra, neste caso específico, utilizou-se a aproximação com os valores experimentais. Então os valores que tiveram um melhor ajuste foram aqueles em que o módulo de cisalhamento da fibra foi igual ou superior a 4 GPa. Com base na literatura onde se tem relatos de módulos de cisalhamento de 8 GPa para um compósito PET/cânhamo (MADSEN, 2004) e que o módulo de cisalhamento teórico para

a celulose fica em torno de 4,4 GPa (GASSAN et al., 2001), então pode-se supor que o módulo de cisalhamento da fibra de juta pode ser algo em torno de 5 GPa.

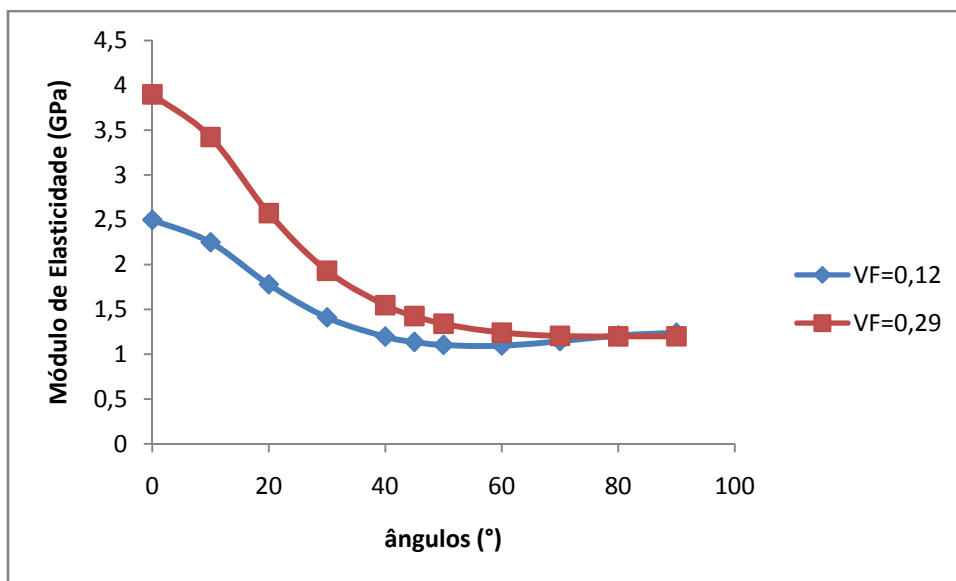
Os resultados obtidos demonstram ainda que as propriedades em cisalhamento são muito mais dependentes das características cisalhantes das matrizes do que das características das fibras. Pois o módulo de cisalhamento da fibra varia de perto de zero até infinito e o módulo de cisalhamento do compósito praticamente não se altera. Neste caso específico o PP H 103 foi o que apresentou o maior módulo de cisalhamento e por conseguinte os compósitos produzidos com ele, independentemente do fio utilizado, apresentou compósitos com maiores valores de módulo de cisalhamento.

Conhecendo-se o módulo de cisalhamento da fibra é possível se determinar o comportamento do módulo de elasticidade em função da direção das fibras, para compósitos com outros teores de fibra.

Para isto foram utilizados os compósitos produzidos com fio 10/2, com uma e três camadas de fibra (fração volumétrica de 0,12 e 0,27, respectivamente). A Figura 40, mostra o comportamento para estes compósitos com as matrizes H 103 e H 301.



(a)



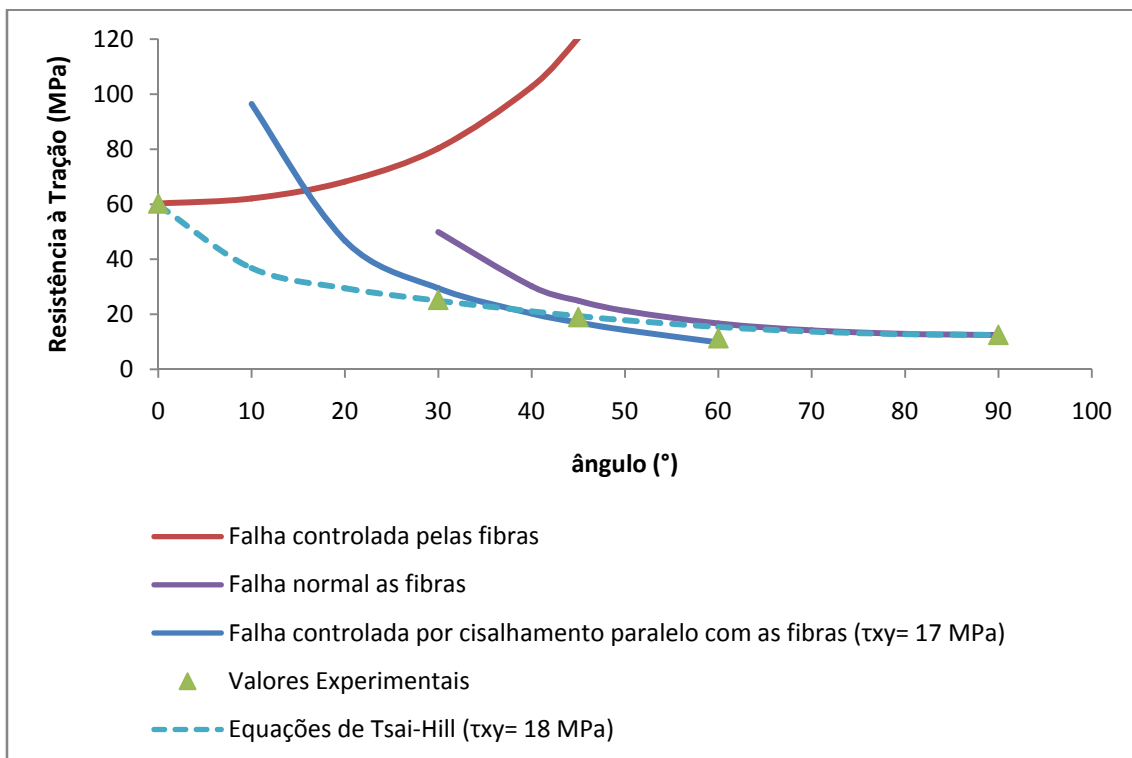
(b)

Figura 40 - Comportamento teórico para o módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibra para os compósitos produzidos com fio 10/2 e com as matrizes (a) H 103 e (b) H 301, com $G_f = 5$ GPa

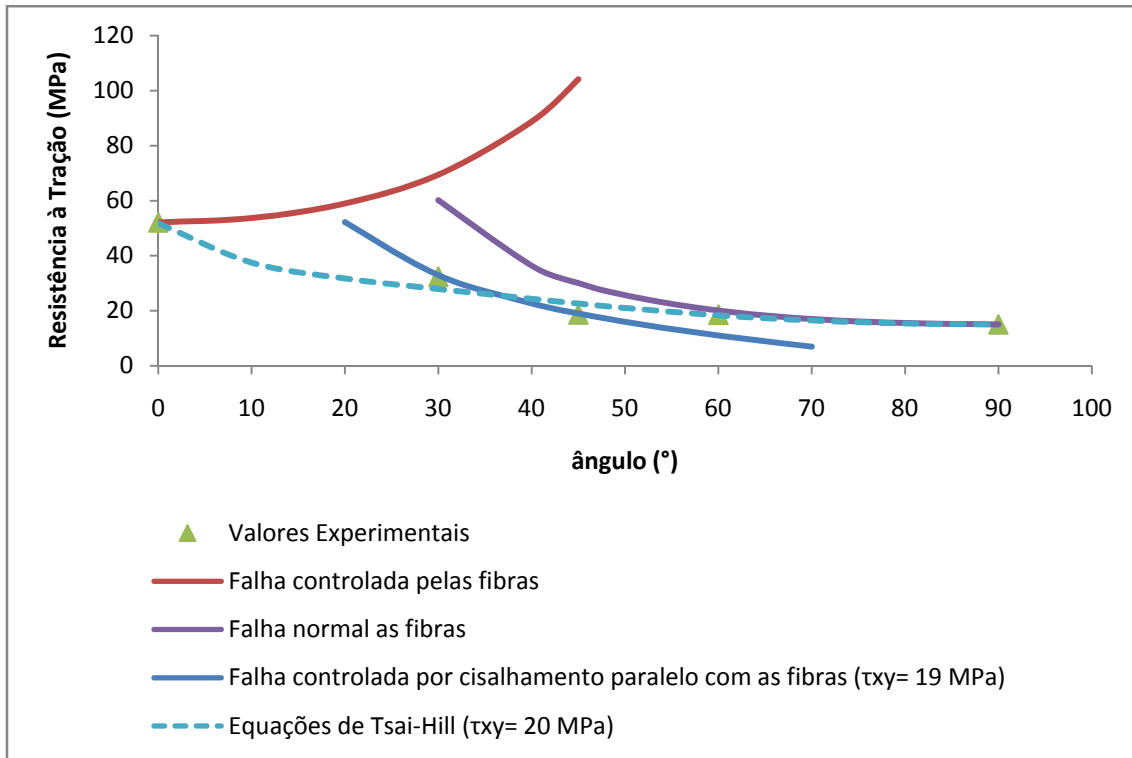
Com base nas Figuras 40 a) e b), é possível observar que com as fibras alinhadas a 60° os compósitos tendem a ter praticamente o mesmo comportamento, independente do teor de fibra. Possivelmente, a partir desta

angulação das fibras, estas não tenham um influência tão pronunciada nas propriedades elásticas do compósito, que passa a ser mais influenciada pelas propriedades da matriz.

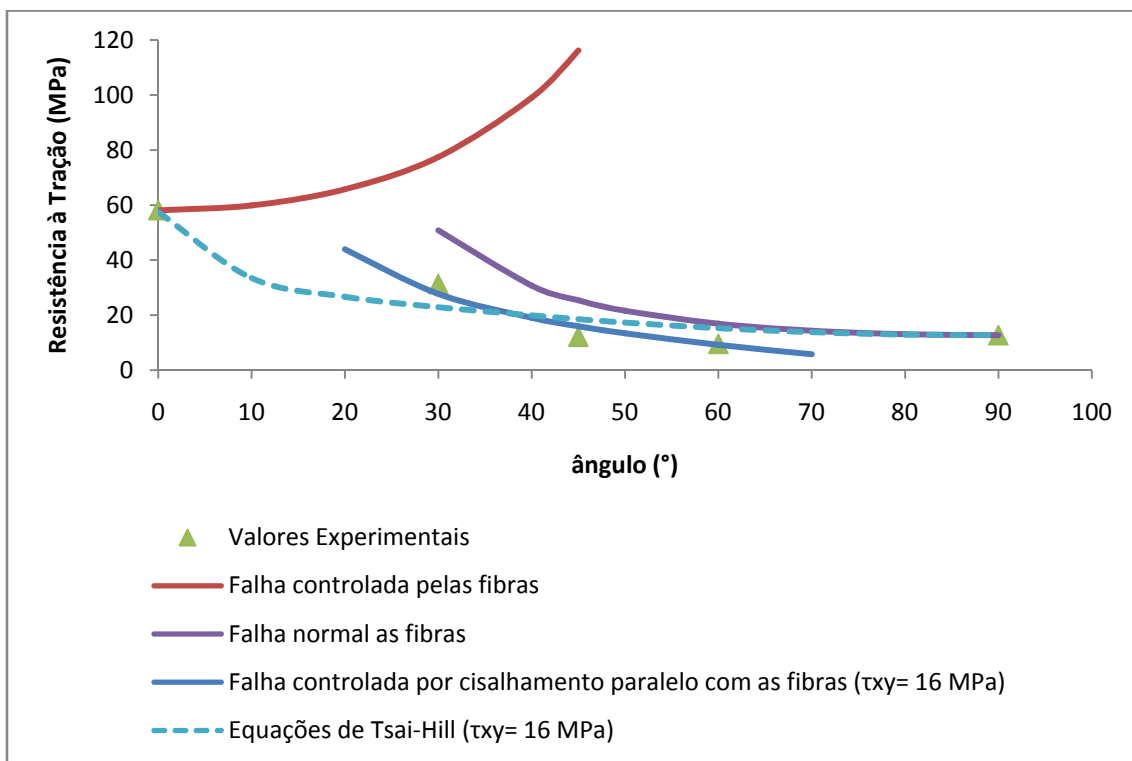
Através dos valores experimentais do módulo de elasticidade, foi possível se determinar o módulo de cisalhamento da fibra de juta e dos compósitos em estudo. Agora com os valores experimentais de resistência à tração, estima-se a tensão de cisalhamento do compósito. Para isto foram utilizados dois modelos, já citados anteriormente, a teoria da máxima tensão e a equação de Tsai-Hill. Os resultados obtidos para estes dois modelos, ajustados aos valores experimentais, são mostrados na Figura 41.



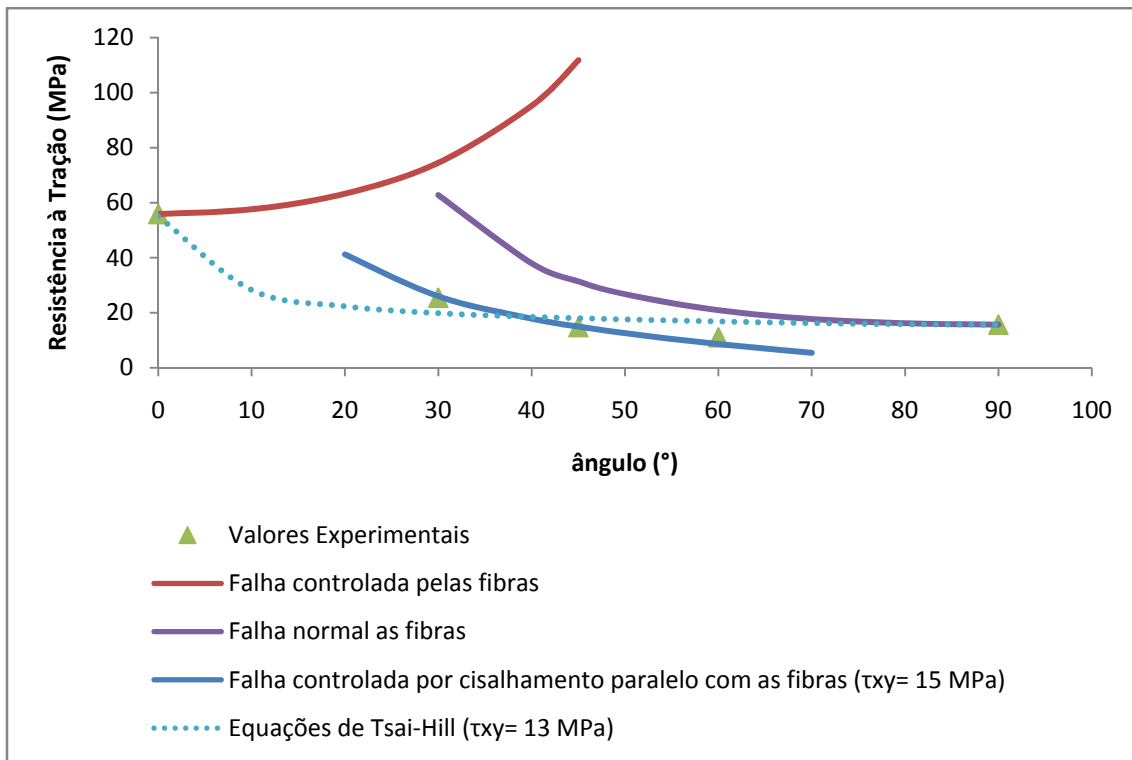
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 41 - Ajuste dos valores de resistência à tração teóricos com os experimentais para os compósitos: (a) H 103 e fio 10/1; (b) H 301 e fio 10/1; (c) H 103 e fio 10/2; e, (d) H 301 e fio 10/2

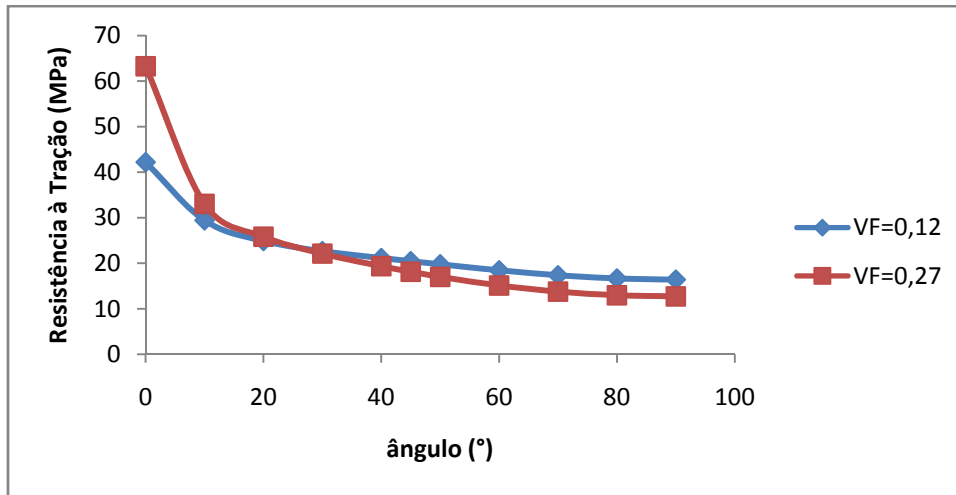
Com base na Figura 41 é possível se observar que a teoria da máxima tensão (pg. 58 e 59) se aplica perfeitamente a estes compósitos. A 0° (fibras orientadas axialmente) tem-se as fibras controlando o comportamento, em 30° , 45° e 60° tem-se a influência do cisalhamento e a 90° a matriz controla o comportamento. Além da teoria da máxima tensão, foi utilizada a equação de Tsai-Hill (pg. 59) para se determinar, com base nos ajustes experimentais, o valor da tensão de cisalhamento dos compósitos em estudo. Na Tabela 18, estão sumarizados estes valores médios (média entre os dois modelos utilizados).

Tabela 18 - Valores médios estimados para a tensão de cisalhamento dos compósitos em estudo

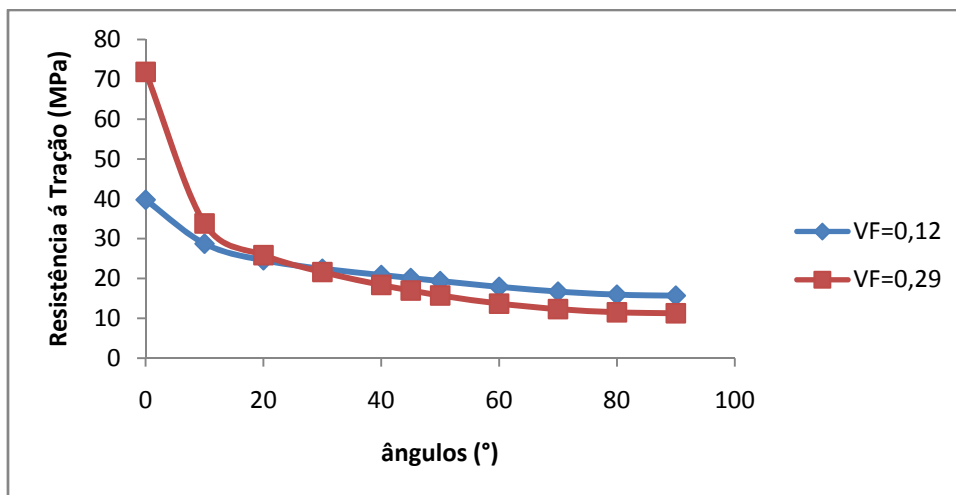
Compósitos	Tensão de cisalhamento média (MPa)
H 103 e fio 10/1	17,5
H 301 e fio 10/1	19,5
H 103 e fio 10/2	16,0
H 301 e fio 10/2	14,0

Observa-se, na Tabela 18, que a tensão de cisalhamento dos compósitos com fio 10/1, foi ligeiramente superior àqueles feitos com fio 10/2.

Com base nestes valores e utilizando a equação de Tsai-Hill, é possível se determinar o comportamento dos compósitos para outros teores de fibra, neste caso para os compósitos feitos com o fio 10/2 (Figura 42), com uma e duas camadas de fibra.



(a)



(b)

Figura 42 - Resistência à tração teórica em função da fração volumétrica e da direção das fibras, para os compósitos com fio 10/2 e matriz (a) H 103 e (b) H 301

Os resultados teóricos demonstram que com o aumento do teor de fibra, têm-se um decréscimo razoável na resistência à tração quando o alinhamento das fibras sai da direção axial para a transversal. Este mesmo decréscimo não é tão significativo quando se tem baixos teores de fibra. Tal comportamento está ligado ao fato das fibras em ângulos maiores funcionarem mais como defeito do que como reforço, sendo assim quanto mais fibra mais defeitos. Sendo

assim, compósitos com um baixo teor de fibra (neste caso, com uma camada de fibra), tendem a apresentar uma menor queda nesta propriedade em função da orientação das fibras.

8.4 Comportamentos Mecânico dos Compósitos PP/Fios de Juta em Flexão

Os resultados mecânicos em flexão dos compósitos PP/fios de juta são apresentados na Tabela 19. Os valores foram obtidos dos gráficos, tensão x deformação, sendo o módulo de elasticidade calculado através da equação 13 (pg. 73), considerando como região linear as deformações ocorridas de 0 a 0,5mm. A resistência à flexão, neste caso, como não houve a ruptura dos corpos de prova, é o último valor quando a deformação atinge 3 mm (5% do espaçamento entre os apoios).

Tabela 19 - Resultados mecânicos em flexão

Polipropileno	Laminas	Teor de fibra, em peso (%)	Resistência ao Dobramento (MPa)	Módulo de Elasticidade ao Dobramento (GPa)
PP H 103	-	-	14,87±0,82	1,47
PP H 301	-	-	14,96±1,70	1,53
Fio 10/1				
PP H 103	2	35,21	46,79±4,56	7,84±0,77
	3	43,05	53,05±3,58	8,16±0,76
PP H 301	2	29,41	47,57±2,24	6,41±0,42
	3	35,20	56,54±3,07	5,31±0,85
Fio 10/2				
PP H 103	2	36,71	43,57±2,12	6,00±0,91
	3	41,00	61,72±4,81	4,92±0,39
PP H 301	2	37,72	45,63±4,19	5,60±0,82
	3	41,82	53,76±3,83	3,58±0,91

Os resultados mostram que independente do tipo de matriz e do diâmetro do fio utilizado, a resistência ao dobramento aumenta com o aumento

do teor de fibra. Comportamento similar a este tem sido reportado por vários autores como, MONTEIRO, et al. 2006; MOHANTY, et al. 2006. Este resultado, pode ser atribuído ao comprimento da fibra utilizada. Com fios longos e alinhados, tem-se um maior contato entre a fibra e a matriz, fazendo com que os esforços trativos e compressivos, experimentados pelo compósito durante o ensaio, sejam mais facilmente transmitidos da matriz para a fibra. Por outro lado, a resistência à flexão está intimamente ligada ao material colocado na superfície do compósito, que neste caso, são os fios de juta (Figura 43).

Para o módulo de elasticidade o comportamento não é o mesmo observado para a resistência ao dobramento. Para esta propriedade houve uma queda, quando se aumentou o teor de fibra (2 para 3 camadas) em praticamente todos os compósitos analisados. Somente os produzidos com o PP H 103 e fio 10/1, foi quem apresentou comportamento diferente. Entretanto, mesmo com a queda para os compósitos com teor de fibra mais elevado, o módulo elástico dos compósitos foram significativamente superiores aos da matriz. A queda no módulo elástico para os compósitos com três camadas, pode estar associado a camada de fibra no interior do compósito. Esta camada pode estar posicionada na linha neutra, não gerando, desta forma, nenhum efeito reforçante.

Outro fator deve ser mencionado é que em flexão se tem uma grande influência das propriedades de cisalhamento. Sendo assim, pode-se observar que os maiores valores de módulo de elasticidade em dobramento foram obtidos pelos compósitos que tinham por matriz o PP H 103, justamente o polímero que apresentou maior módulo de cisalhamento.



Figura 43 – Compósitos com duas e três camadas

Ao analisar o comportamento em flexão em função do tipo de matriz utilizada, verifica-se que não há a predominância de uma matriz sob a outra, em relação à resistência ao dobramento (Figura 44). O mesmo comportamento ocorre quando se analisa esta propriedade em função do tipo de fio utilizado.

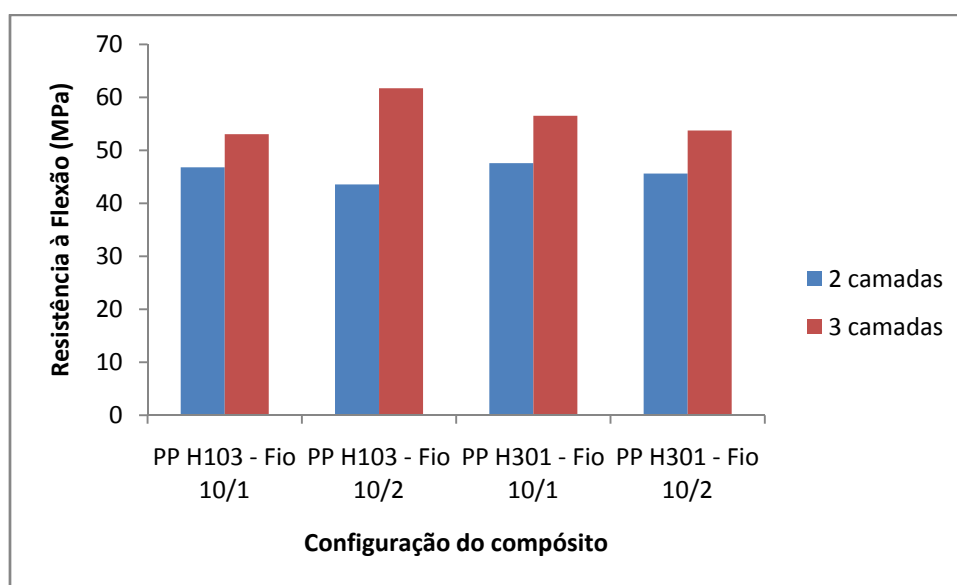


Figura 44 - Resistência à flexão em função do tipo de matriz, de fio e número de camadas

Em relação ao módulo de elasticidade, observa-se que, os compósitos produzidos com fio 10/1 e com o polipropileno de maior índice de fluidez e maior módulo de cisalhamento (PP H 103), apresentou o melhor comportamento. Isto pode estar ligado ao fato de que com fios mais finos, tem-se uma maior área de contato facilitando a transferência dos esforços da matriz para a fibra. Some-se a isto, a tendência desta matriz, de molhar melhor a fibra, devido a sua maior fluidez (Figura 42). Além disto, o compósito com a matriz

PP H 301 e fio 10/1 apresentou melhores resultados do que o similar com fio 10/2. Podendo-se, concluir, que para estes casos, um fio mais fino gera um produto mais rígido.

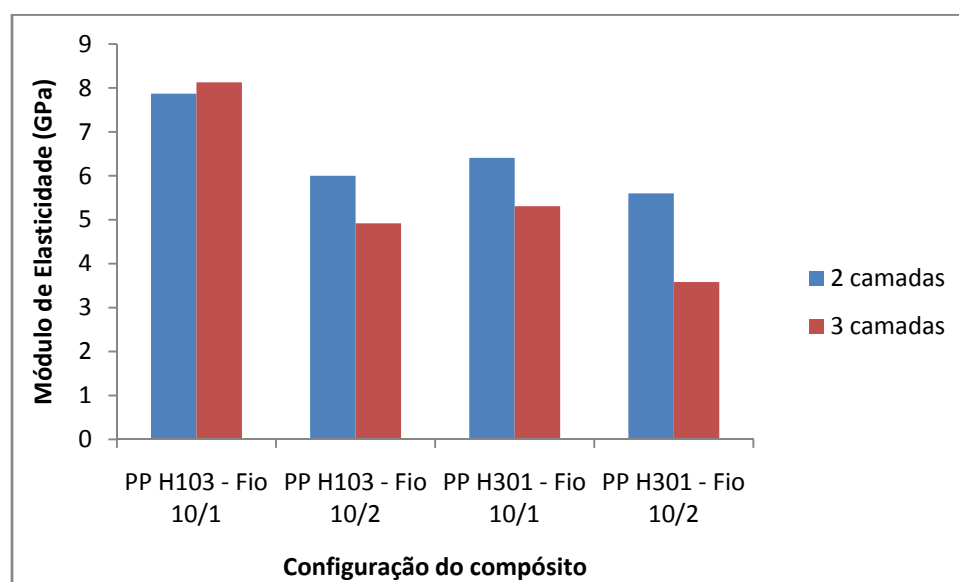


Figura 45 - Módulo de elasticidade em função da matriz, do tipo de fio e do número de camadas

Comparando-se os resultados resistência à flexão no dobramento com outros materiais, Tabela 20, verifica-se que os compósitos em estudo apresentam propriedades em flexão bem superiores em relação a materiais tradicionais, como o gesso e a madeira compensada.

Material	Fração em peso (%)	Resistência à Flexão (MPa)
Tecido de juta/Polietileno reciclado	30	28,66
Fibra alinhada de juta/poliéster	44	89
Fibra alinhada de juta/Epóxi	33	150
Fibra picada de juta/Poliestireno	30	55
Madeira compensada	-	15 – 21
Painel de madeira de baixa densidade	-	5 – 10
Painel de gesso	-	9 – 11

Fonte: (MONTEIRO, et al., 2006)

8.5 Resistência ao Impacto

A Tabela 20 mostra os valores de resistência ao impacto dos compósitos tanto na direção axial quanto na transversal. Os valores apresentados são para corpos de prova não entalhados. No caso das matrizes os valores apresentados são de corpos de prova entalhados, tendo-se em vista que os corpos de prova não entalhados de polipropileno não romperam durante o ensaio com o pendulo utilizado.

Os resultados apresentados na Tabela 20 mostram que a incorporação de um material rígido em uma matriz tenaz, provoca uma redução na resistência ao impacto, quando se compara o compósito a matriz pura. Esta redução foi observada de maneira qualitativa, pois os corpos de prova, não entalhados, de polipropileno puro não romperam. Contudo, normalmente a adição de agro-fibras a uma matriz termoplástica tende a diminuir a resistência ao impacto, principalmente se fibras curtas forem utilizadas (PLACKETT, et al. 2003). Por outro lado quando tecidos são utilizados como reforço, esta propriedade se mantém inalterada (DIEU et al. 2004).

Porém, observa-se que com o aumento do teor de fibra, aumenta-se a resistência ao impacto. Fato este provocado por uma maior quantidade de fios de juta impedindo a propagação da trinca catastrófica. E este aumento é maior para os compósitos produzidos com fio 10/2. Em relação a posição da fibra durante o ensaio, observa-se que há uma queda vertiginosa na propriedade em questão quando se compara a direção axial com a transversal. Na direção transversal, ao contrário da axial, não há a presença de fibras perpendiculares a propagação da trinca, sendo assim as fibras presentes no compósito

funcionam como descontinuidades para a matriz facilitando a quebra do mesmo.

Por fim quando se compara os dois tipos de polipropileno utilizados, verifica-se que aquele que apresenta uma maior resistência ao impacto (PP H 301) foi o que apresentou a maior queda nesta propriedade. Este polipropileno apresenta uma maior resistência ao impacto, então com a incorporação de material mais rígido tende a ter uma queda mais acentuada do que o PP H 103.

Tabela 20 – Resistência ao impacto dos compósitos

Polipropileno	Laminas	Teor de fibra, em peso (%)	Resistência ao impacto (J/m)	
			Axial	Transversal
PP H 103	-	-	25*	
PP H 301	-	-	30*	
Fio 10/1				
PP H 103	2	35,21	166±11	44±11
	3	43,05	171±25	32±8
PP H 301	2	29,41	151±16	41±16
	3	35,20	156±32	48±2
Fio 10/2				
PP H 103	2	36,71	197±47	33±3
	3	41,00	258±55	40±4
PP H 301	2	37,72	201±24	56±19
	3	41,82	227±37	41±8

*Valores fornecidos pelo fabricante, os corpos de prova (não entalhados) não romperam.

CAPÍTULO IX

9. Conclusões

A utilização de fios longos, alinhados e contínuos de juta em matrizes termoplástica, do ponto de vista mecânico, é extremamente viável. Quase todas as propriedades em estudo foram incrementadas com a introdução dos referidos fios, principalmente módulo elástico (em tração e flexão) e resistência, tanto a tração quanto na compressão. A resistência ao impacto apresentou valores menores que a matriz pura, porém ainda estão dentro de limites aceitáveis.

Dos fios utilizados neste estudo, 10/1 e 10/2, o primeiro apresentou um maior módulo de elasticidade e o segundo uma maior resistência, tanto na tração quanto na flexão. Por outro lado, o fio 10/1, apresentou durante todo estudo um comportamento mais previsível. Além disto, os compósitos com fios 10/2 apresentaram uma maior resistência ao impacto.

Em relação às matrizes, principalmente para os polipropilenos, a de maior índice de fluidez, H 103, apresentou melhores resultados do que aqueles compósitos produzidos com o H 301, em tração e flexão. Já em impacto os melhores resultados foram obtidos pelo H 301.

A análise micrográfica comprovou que compósitos produzidos com o PP H 103 tendem a apresentar uma melhor interface do que os compósitos com um menor índice de fluidez (H 301). Esta mesma análise demonstrou que a secagem prévia das fibras melhora a interação fibra/matriz e aumenta a resistência à tração do compósito.

Do ponto de vista teórico, os compósitos por apresentarem uma geometria bem definida, têm suas propriedades facilmente determinada através de modelos relativamente simples. Para o módulo de elasticidade, a regra das misturas direta e inversa dá uma boa aproximação. Para a resistência à tração a regra das misturas direta dá uma boa aproximação na direção axial as fibras na direção transversal e em outra orientações da fibras se faz necessário a utilização de outras equações como as Tsai-Hill e as de Harris, Hull e Clayne, além da teoria da máxima tensão. Assim pode-se caracterizar mecanicamente os compósitos em estudo.

CAPÍTULO X

10. Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Otimizar o tempo e a temperatura de secagem da fibra de juta;
- Otimizar o tempo e a temperatura de processamento em função do índice de fluidez da matriz;
- Determinar de forma mais precisa as características dos cordões de juta;
- Determinar o coeficiente de Poisson da matriz e dos compósitos;
- Realizar ensaios com outros teores de fibra e verificar se as equações utilizadas geram boas aproximações;
- Utilizar agentes de acoplamento;
- Mecanizar o processo de enrolamento da fibra de juta;
- Utilizar o processo descrito para confeccionar compósitos com outras matrizes, tais como poliestireno, policloreto de vinil e com materiais reciclados;
- Estudar o envelhecimento e absorção de água nos compósitos com esta configuração;

CAPÍTULO XI

11. Referencias Bibliográficas

- ACHA, B. A., ROBOREDO, M. M., & MARCOVICH, N. E. (2007). Creep and dynamic mechanical behavior of PP-jute composites: Effect of interfacial adhesion. *Composites: Part A* , 38, pp. 1507-1516.
- ANGELOV, I., WIEDMER, S., EVSTATIEV, M., FRIEDRICH, K., & MENNIG, G. (2007). Pultrusion of Flax/Polypropylene Yarn. *Composite Part A: applied science and manufacturing* , 38, pp. 1431-1438.
- ARBELAIZ, A., FERNÁNDEZ, B., VALEA, A., & MONDRAGON, I. (2006). Mechanical properties of short flax fibre bundle/poly(e-caprolactone) composites: Influence of matrix modification and fibre content. *Carbohydrate Polymers* , 64, pp. 224-232.
- BATISTA, W. W. (1995). *Propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta: Efeitos de tratamentos superficiais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Química, Campina Grande, PB.
- BLEDZKI, A. K., & GASSAN, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* , 24, pp. 221-274.
- BLEDZKI, A. K., & GASSAN, J. (1997). Natural Fibre Reinforced Plastics. In: N. P. CHEREMISINOFF, *Handbook of Engineering Polymeric Material* (pp. 787-809). New York: Marcel Dekker, Inc.
- BOS, H. L., MÜSSIN, J., & van den OEVER, M. J. (2006). Mechanical properties of short-flax-fibre reinforce compounds. *Composites: Part A* , 37, pp. 1591-1604.
- BRAHMAKUMAR, M., PAVITHRAN, C., & PILLAI, R. M. (2005). Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Composites Science and Technology* , 65, pp. 563-569.

- CALLISTER, W. D. (2003). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (6th ed.). New York: Willey.
- CARVALHO, L. H., ALSINA, O. L., RAMOS FILHO, F. G., & D'ALMEIDA, J. R. (2005). Thermal properties of hybrid lignocellulosic fabric-reinforced polyester matrix composites. *Composites Polymer Testing* , 24, pp. 81-85.
- CAVALCANTI, W. S. (2000). Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/Juta: Efeitos de Tratamentos Superficiais, Envelhecimento Térmico e Absorção de Água. *Dissertação de Mestrado* . Campina Grande, PB: Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande.
- CHAND, N., & DWIVEDI, U. K. (2006). Effect of coupling agent on abrasive wear behaviour of chopped jute fibre-reinforced polypropylene composites. *Wear* , 261, pp. 1057-1063.
- CICHOCKI Jr., F. R., & THOMASON, J. L. (2002). Thermoelastic anisotropy of a natural fiber. *Composites Science and Technology* , 62, pp. 669-678.
- CLEMONS, C. M., & CAULFIELD, D. F. (2005). Natural Fibers. In: M. XANTHOS, *Functional Fillers for Plastics* (pp. 195-204). New York: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
- Companhia Têxtil Castanhal*. (s.d.). Acesso em 14 de Novembro de 2007, disponível em Site da Companhia Têxtil Castanhal: www.castanhal.com.br
- COSTA, R. (1997). *Compósitos poliéster-juta: efeitos de modificações químicas no reforço e na matriz poliéster*. Dissertação de Mestrado, UFPB, Departamento de Engenharia Química, Campina Grande, PB.
- CRAWFORD, R. J. (1998). *Plastics Engineering*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- D'ALMEIDA, J. R. (1987). Propriedades mecânicas da fibra de juta. *Ciência e Cultura* , 39, pp. 1025-1032.
- DIEU, T. V., PHAI, L. T., NGOC, P. M., TUNG, N. H., THAO, L. P., & QUANG, L. H. (2004). Study on preparation of polymer composites based on

polypropylene reinforced by jute fibers. *JSME International Journal* , 47 (No. 4), pp. 547 - 550.

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

FACCA, A. G. (2005). Predicting the Elastic Modulus of Natural Fibre Reinforced Thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* .

GANSTER, J., FINK, H.-F., & PINNOW, M. (2006). High-tenacity man-made cellulose fibre reinforced thermoplastics - Injection moulding compounds with polypropylene and alternative matrices. *Composites: Part A* , 37, pp. 1796-1807.

GASSAN J., C. A. (2001). Calculation of elastic properties of natural fibers. *Journal of Materials Science* , 36, pp. 3715-3720.

GASSAN, J., & BLEDZKI, A. K. (1997). The influence of fiber-surface treatment on the mechanical properties of jute-polypropylene composites. *Composites: Part A* , 28A, pp. 1001-1005.

GEORGE, J., & SABU, T. (1997). Short Fiber Reinforce Plastic Composites. In: N. P. CHEREMISINOFF, *Handbook of Engineering Polymeric Materials* (pp. 811-838). New York: Marcel Dekker, Inc.

GEORGE, J., BHAGAWAN, S. S., & THOMAS, S. (1998). Effects of environment on the properties of low-density polyethylene composites reinforced with pineapple-leaf fibre. *Composites Science and Technology* , 58, pp. 1471-1485.

GUEDES, B., & FILKAUSKAS, M. E. (1986). *O Plástico*. São Paulo: Erica.

HAGE Jr., E. (1989). *Compósitos e Blendas Poliméricas*. Instituto Latino-Americano de Tecnologia e IBM, Campinas – SP.

HALPIN, J. C., & KARDOS, J. L. (1976). The Halpin-Tsai Equations: a Review. *Polymer Engineering and Science* , 16, pp. 344-352.

- HERRERA-FRANCO, P. J., & VALADEZ-GONZÁLEZ, A. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites: Part B*, 36, pp. 597-608.
- HERRERA-FRANCO, P. J., & VALADEZ-GONZÁLEZ, A. (2004). Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites. *Composites: Part A*, 35, pp. 339-345.
- HULL, D. (1981). *An introduction to composite materials*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ipiranga Petroquímica*. (s.d.). Acesso em 15 de Novembro de 2007, disponível em Site da Ipiranga Petroquímica: www.ipt.com.br
- JAYARAMAN, K. (2003). Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation. *Composites Science and Technology*, 63, pp. 367-374.
- JAYARAMAN, K., & BHATTACHARYYA, D. (2004). Mechanical performance of woodfibre-waste plastic composite materials. *Resources Conservation & Recycling*, 41, pp. 307-319.
- JONES, R. M. (1975). *Mechanics of Composite Materials*. Washington: McGraw-Hill Book Company.
- JOSEPH, K., THOMAS, S., & PAVITHRAN, C. (1996). Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. *Polymer*, Vol 37, number 23, p. 5139-5149.
- KALAPRASAD, G., PRADEEP, P., MATHEW, G., PAVITHRAN, C., & THOMAS, S. (2000). Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres. *Composites Science and Technology*, 60, pp. 2967-2977.
- KEENER, T. J., STUART, R. K., & BROWN, T. K. (2004). Maleated coupling agents for natural fibre composites. *Composites: Part A*, 35, pp. 357-362.

- KHAN, M. A., HASSAN, M. M., & DRZAL, L. (2005). Effect of 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) on the mechanical and thermal properties of jute-polycarbonate composite. *Composites: Part A* , 36, pp. 71-81.
- KHONDKER, O. A., ISHIAKU, U. S., NAKAI, A., & HAMADA, H. (2006). A novel processing technique for thermoplastic manufacturing of unidirectional composites reinforced with jute yarns. *Composites: Part A* , 37, pp. 2274-2284.
- KIM, J.-P., YOON, T.-H., MOON, S.-P., RHEE, J.-M., & LEE, J.-S. (2006). Wood-polyethylene composites using ethylene-vinyl alcohol copolymer as adhesion promoter. *Bioresource Technology* , 97, pp. 494-499.
- KUAN, C. F., KUAN, H. -C., MA, C. -C., & HUANG, C. -M. (2006). Mechanical, thermal and morphological properties of water-crosslinked wood flour reinforced linear low-density polyethylene composites. *Composites: Part A* , 37, pp. 1696-1707.
- KUMAR, A. P., SINGH, R. P., & SARWADE, B. D. (2005). Degradability of composites, prepared from ethylene-propylene copolymer and jute fiber under accelerated aging and biotic environments. *Materials Chemistry and Physics* , 92, pp. 458 - 469.
- KUMAR, P. (1986). Mechanical properties of jute fibres and their composites. *Indian Journal of Technology* , 24, pp. 29-32.
- LEI, Y., WU, Q., YAO, F., & XU, Y. (2007). Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites. *Composites: Part A* , 38, pp. 1664-1674.
- LI, B., & HE, J. (2004). Investigation of mechanical property, flame retardancy and thermal degradation of LLDPE-wood-fibre composites. *Polymer Degradation and Stability* , 83, pp. 241-246.
- LÓPEZ-MACHADO, M. A., & ARROYO, M. (2000). Thermal and dynamic mechanical properties of polypropylene and short organic fiber composites. *Polymer* , 41, pp. 7761-7767.

- LUYT, A. S., & MALUNKA, M. E. (2005). Composites of low-density polyethylene and short sisal fibres: the effect of wax addition and peroxide treatment properties. *Thermochimica Acta* , 426, pp. 101-107.
- MADSEN, B. (2004). *Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites - An Experimental Study*. Technical University of Denmark. Lyngby: BYG-DTU.
- MAZUMDAR, S. K. (2002). *Composites Manufacturing - Materials, Product and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- MOHANTY, A. K., & MISRA, M. (1995). Studies on jute composites - A literature review. *Polymer Plastics Technology and Engineering* (34), pp. 729-792.
- MOHANTY, A., KHAN, M. A., & HINRICHSEN, G. (2000). Surface modification of jute and its influence on performance of biodegradable jute-fabric/Biopol composites. *Composites Science and Technology* , 60, pp. 1115-1124.
- MOHANTY, S., NAYAK, S. K., VERMA, S. K., & TRIPATHY, S. S. (2004). Effect of MAPP as a coupling agent on the performance of jute-PP composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* , 23, pp. 625 - 637.
- MOHANTY, S., VERMA, S. K., & NAYAK, S. K. (2006). Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites. *Composites Science and Technology* , 66, pp. 538-547.
- MONTEIRO, S. N., TERRONES, L. A., CAMERINI, A. L., PETRUCCI, L. J., & D'ALMEIDA, J. R. (2006). Propriedades de compósitos de tecido de juta descartado reforçando matriz de polietileno reciclado. *Revista Matéria* , 11, pp. 403-411.
- MORASSI, O. J. (1995). Fibras naturais, aspectos gerais e aplicação na indústria automobilística. *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, (pp. 1259-1262).
- PARK, J. M., QUANG, S. T., HWANG, B. S., & DEVRIES, K. L. (2006). Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibers/polypropylene (PP)-

maleic polypropylene copolymers (PP-MAPP) composites using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission. *Composites Science and Technology* , 66, pp. 2686-2699.

PAUL, A., JOSEPH, K., & THOMAS, S. (1997). Effect of surface treatments on the electrical properties of low-density polyethylene composites with short sisal fibers. *Composites Science and Technology* , pp. 67-79.

PEREIRA, J. C. (2003). *Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compostos*. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis.

PILLING, J. (s.d.). *Composite Materials Design*. Acesso em 15 de Julho de 2008, disponível em <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/>

PLACKETT, D., ANDERSEN, T. L., PEDERSEN, W. B., & NIELSEN, L. (2003). Biodegradable composites based on L-poly lactide and jute fibres. *Composites Science and Tecnology* , 63, pp. 1287-1296.

Portal Braskem. (s.d.). Acesso em 23 de abril de 2007, disponível em Site da Braskem: www2.braskem.com.br

POWEL, P. C. (1983). *Engineering with Polymers*. London: Chapman & Hall.

RANA, A. K., MANDAL, A., & BANDYOPADHYAY, S. (2003). Short jute fiber reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading. *Composites Science and Technology* , 63, pp. 801-806.

SHAFFER, J., PHILIPPIDIS, T. P., & VASSILOPOULOU, A. P. (2004). Polymer Composites. In: J. K. WESSEL (Ed.), *Handbook of Advanced Materials - Enabling New Designs* (pp. 1-64). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

SINGLETON, A. C., BAILLIE, C. A., BEAUMONT, P. W., & PEIJS, T. (2003). On the mechanical properties, deformation and fracture of natural fibre/recycled polymer composite. *Composites: Part B* , 34, pp. 519-526.

TOLEDO FILHO, R. D. (1993). *Reforços Naturais - Estrutura e Propriedades Mecânicas*. PUC, Rio de Janeiro.

- TORRES, F. G., & ARAGON, C. L. (2006). Final product testing of rotational moulded natural fibre-reinforce polyethylene. *Polymer Testing* , 25, pp. 568-577.
- VALADEZ-GONZALEZ, A., CERVANTES-UC, J. M., OLAYO, R., & HERRERA-FRANCO, P. J. (1999). Effect of fibre surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. *Composites: Part B* , 30, pp. 309-320.
- van de VELDE, K., & KIEKENS, P. (2001). Thermoplastic pultrusion of natural reinforced composites. *Composites Structures* , 64, pp. 355-360.
- Van de WEYENBERG, I., IVENS, J., De COSTER, A., KINO, B., BAETENS, E., & VERPOEST, I. (2003). Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composites Science and Technology* , 63, pp. 1241-1246.
- WAMBUA, P., VANGRIMDE, B., LOMOV, S., & VERPOEST, I. (2007). The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles. *Composite Structures* , 77, pp. 232-240.
- WANG, W., SAIN, M., & COOPER, P. A. (2005). Hygrothermal weathering of rice hull/HDPE composites under extreme climatic conditions. *Polymer Degradation and Stability* , 90, pp. 540-545.
- XANTHOS, M. (2005). Polymers and Polymer Composites. In: M. XANTHOS (Ed.), *Functional Fillers for Plastics* (pp. 3-16). New York: WILEY - VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
- ZAMPALONI, M., POURBOGHRAT, F., YANKOVICH, S. A., RODGERS, B. N., MOORE, J., DRZAL, L. T., et al. (2007). Kenaf fibre reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions. *Composites: Part A* , 38, pp. 1569-1580.

ANEXOS

Procedimento para o cálculo dos teores em massa das lâminas

1. Os filmes de PE e PP e as placas têm a sua massa aferida, e anotada (mf – massa do filme, e mp – massa das placas);
2. Após a adição das fibras, o conjunto filme + placa metálica + fibras, tem sua massa medida, daí encontra-se a massa da fibra, subtraindo desta, os valores dos filmes plásticos e da placa metálica ($m_{fib} = m_c - m_f - m_p$);
3. Após a compressão da lâmina e da retirada do excesso de filme, a lâmina é pesada, e a partir daí dividiu-se a massa da fibra pela massa da lâmina, encontrando desta forma o percentual do teor de fibra na lâmina.

Procedimento para o cálculo dos teores em massa dos laminados

Neste caso, carrega-se o valor percentual da lâmina para o laminado, exemplificando:

Caso a lâmina apresente um teor de 50% em peso de fibra, e esta tenha massa de 100g, então se tem de fibra 50g.

Sendo assim ao se medir a massa do laminado (com uma, duas ou três lâminas) calcula-se o percentual de fibra, desta forma tem-se:

Laminado tendo massa de 300 g, sendo formado por três laminas com teores de 50, 50 e 45%, e estas lâminas 100g, assim, a primeira e a segunda contribuíram com 50g de fibra e a terceira com 45g. Desta forma a massa total de fibra será 145g, e o teor de fibra será de 48,3%.

Procedimento usado para o cálculo da fração volumétrica da fibra de juta no compósito

Neste caso foram feitas duas suposições, a primeira é que a densidade da fibra de juta é de $1,3\text{g/cm}^3$ (este valor é extremamente variável indo de 1,1 até $1,5\text{g/cm}^3$) e para a matriz a densidade descrita no catálogo do fabricante.

Tomando por base, o teor de fibra para o laminado e baseando-se no volume do laminado (largura x comprimento x espessura), além da densidade da fibra e da matriz, calcula-se a fração volumétrica de fibra no laminado.

Processos de Fabricação de Compósitos com Matriz Termofixa

Em termos comerciais mais de 75% dos compósitos produzidos são feitos com matriz termofixa. Os usos destes compósitos vão desde a indústria aeroespacial a produtos mais simples, passando pela indústria automobilística e pela produção de componentes esportivos (MAZUMDAR, 2002).

Hand lay-up ou moldagem por contato

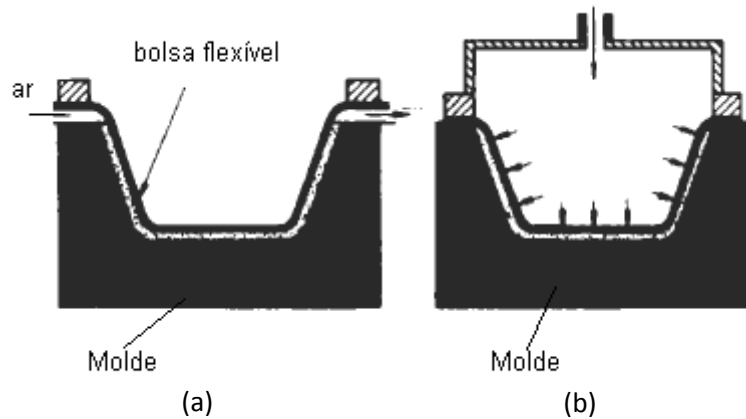
O molde é primeiramente revestido de um desmoldante e posteriormente de uma resina colorida. A seguir as fibras são depositadas sobre o molde e em seguida impregnadas com resina e compactadas com um rolo. O processo se segue para as lâminas sucessivas, Figura A1. A polimerização (solidificação) ou cura da resina pode ser feita com ou sem o molde, isto em função da geometria da peça. A cura da resina pode ser feita em temperatura ambiente ou ser acelerada se colocada em uma estufa a uma temperatura entre 80° C e 120° C. Após a cura da resina e a desmoldagem, a peça é finalizada: retirada de rebarbas, pintura, etc. (PEREIRA, 2003).



Fonte: (PEREIRA, 2003)

Figura A1 - Processo de moldagem por *hand lay-up*

As variações deste processo são (i) *vacuum bag moulding* e (ii) *pressure bag moulding* (Figura A2). Nestes dois processos uma bolsa flexível (normalmente de borracha) é colocada por sobre o molde contendo as camadas de fibra pré-impregnadas com resina. No primeiro caso aplica-se vácuo entre a bolsa e o molde fazendo com que a bolsa se acomode sobre o material comprimido-o até a sua consolidação. No segundo caso, o processo é similar ao primeiro modificando apenas a forma de aplicação da pressão que neste caso é por cima da bolsa flexível (CRAWFORD, 1998).



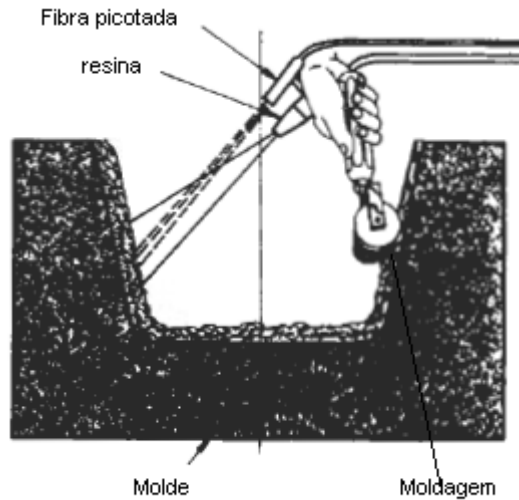
Fonte: (CRAWFORD, 1998)

Figura A2 - Variações da técnica de moldagem *hand lay-up*: (a) *vacuum bag* e (b) *pressure bag*

Spray-up

Este processo consiste em projetar simultaneamente fibras cortadas impregnadas em resina sobre o molde. A lâmina de fibras impregnadas é em seguida compactada por um rolo e novas lâminas podem ser sucessivamente depositadas (Figura A3). Um contra-molde pode eventualmente ser utilizado para a obtenção de faces lisas e para proporcionar uma melhor compactação entre as lâminas. A vantagem deste processo com relação ao anterior é

permitir uma produção em série das peças, no entanto, as características mecânicas das peças são médias devido ao fato das fibras serem picotadas (MAZUMDAR, 2002).

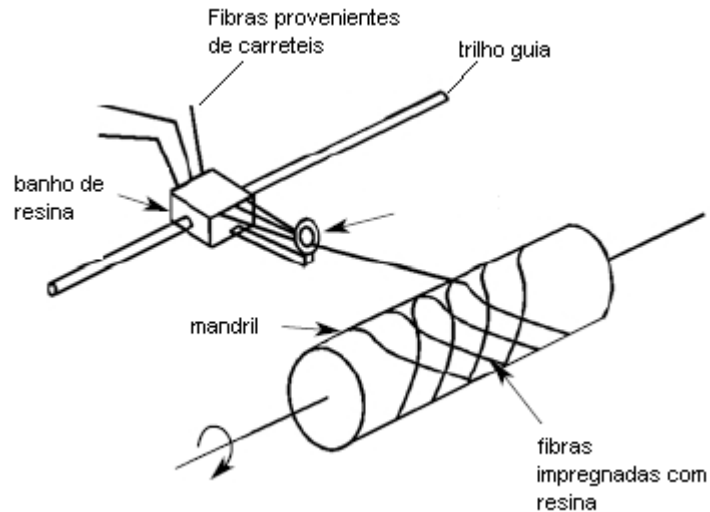


Fonte: (PEREIRA, 2003)

Figura A3 - Moldagem por *Spray-up*

Filament Winding

Neste processo as fibras (contínuas, na forma de fios, *rovins* ou fitas) impregnadas com a resina são dispostas em cima de um mandril giratório em um ângulo desejável. O processo típico é mostrado na Figura A4, no qual a unidade de guia move-se de um lado para o outro e o mandril gira a uma velocidade específica. Através do controle do movimento da unidade guia e do mandril, se controla o ângulo em que as fibras são dispostas. Este processo é muito utilizado para a produção de peças tubulares e pode ser automatizado para se ter uma grande produção e diminuir os custos. Além disto, é único processo utilizado para a produção de vasos de pressão (MAZUMDAR, 2002).

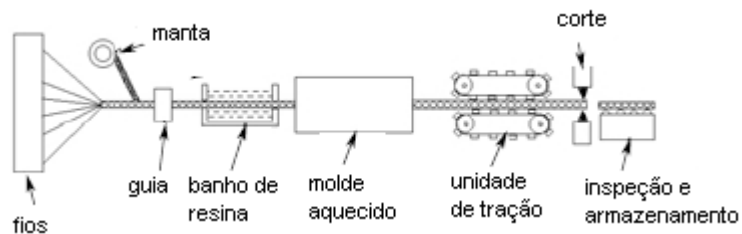


Fonte: (MAZUMDAR, 2002)

Figura A4 - Processo *Filament Winding*

Pultrusão

O processo de pultrusão é um processo de baixo custo e de grande volume de produção, no qual fibras impregnadas por resina são puxadas através de um molde metálico, aquecido, a uma velocidade constante, a fim de se formar a peça. As peças formadas apresentam seção retangular constante e comprimento contínuo, além disto, normalmente não necessitam de acabamento. O processo típico é mostrado na Figura A5 (MAZUMDAR, 2002).



Fonte: (MAZUMDAR, 2002)

Figura A5 - Processo de pultrusão

Moldagem por Transferência de Resina (RTM)

No processo RTM, uma pré-forma é colocada dentro da cavidade de um molde, este é perfeitamente alinhado e fechado. Em seguida injeta-se, através de um ou mais pontos, uma mistura contendo a resina termofixa, catalisador, corante, carga mineral, etc.. Depois da cura (que normalmente ocorre entre 6 e 30 min., dependendo da cinética), a peça é retirada do molde. Neste processo são produzidas peças estruturais (com fibras contínuas) e com bom acabamento de ambos os lados (SHAFFER, PHILIPPIDIS, & VASSILOPOULOU, 2004).

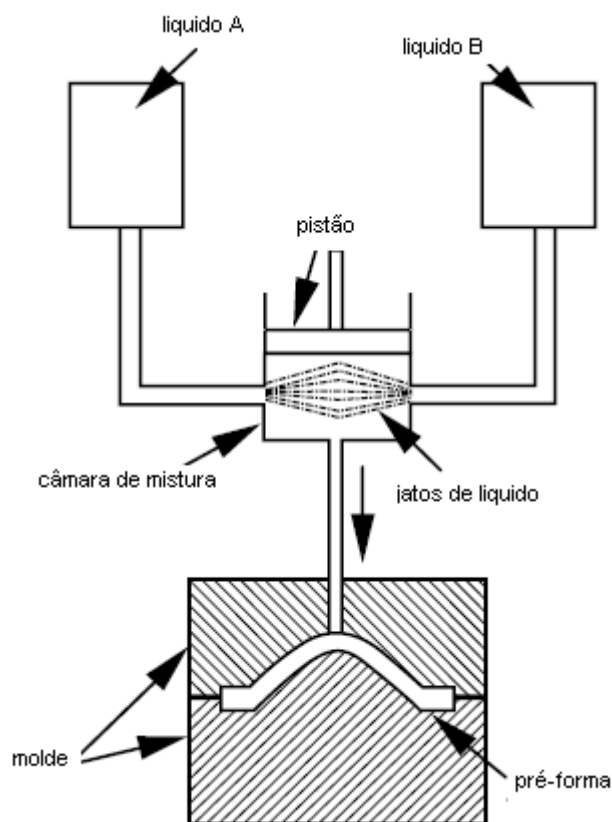
Existem variações deste processo, o VARTM e uma delas. Neste processo as fibras são colocadas dentro do molde e por sobre elas é colocada uma cobertura, que pode ser rígida ou flexível, fechando desta forma o molde. Então é aplicado vácuo, a fim de se puxar a resina para dentro do molde. Este processo é muito utilizado na produção de cascos de barcos, gerando produtos com uma pequena quantidade de bolhas e com um alto teor de fibra (70%), e por ser um processo que ocorre em um molde fechado, com pouca emissão de estireno (MAZUMDAR, 2002).

Outro processo derivado do RMT é o SCRIMP – *Seemann Composites Infusion Molding Process*, foi desenvolvido e patenteado pelas empresas Seemann, TPI e HardCore Composites. Neste processo, que se assemelha muito ao VARTM, ocorre primeiro a aplicação de vácuo, de maneira contínua, para compactar as fibras, e em seguida para puxar a resina para dentro do molde. Este processo é muito empregado na indústria náutica para a produção

de peças médias e grande, e sua maior virtude é o controle do peso da peça, a ausência de bolhas e a ausência da emissão de estireno (MAZUMDAR, 2002).

Moldagem Estrutural por Injeção Reativa (SRIM)

É similar ao RTM, as diferenças estão na resina utilizada e no método de mistura realizado antes da injeção. Neste processo duas resinas A e B são misturadas em uma câmara de mistura a uma velocidade muito alta um pouco antes da injeção (Figura A6). A moldagem ocorre a uma pressão de aproximadamente 1 MPa, para preservar a estrutura da pré-forma fibrosa. A resina utilizada neste processo possui uma baixa viscosidade, sendo a mais comum o polisocionato. A pré-forma utilizada pode ser feita tanto de fibras curtas quanto com fibras longas.

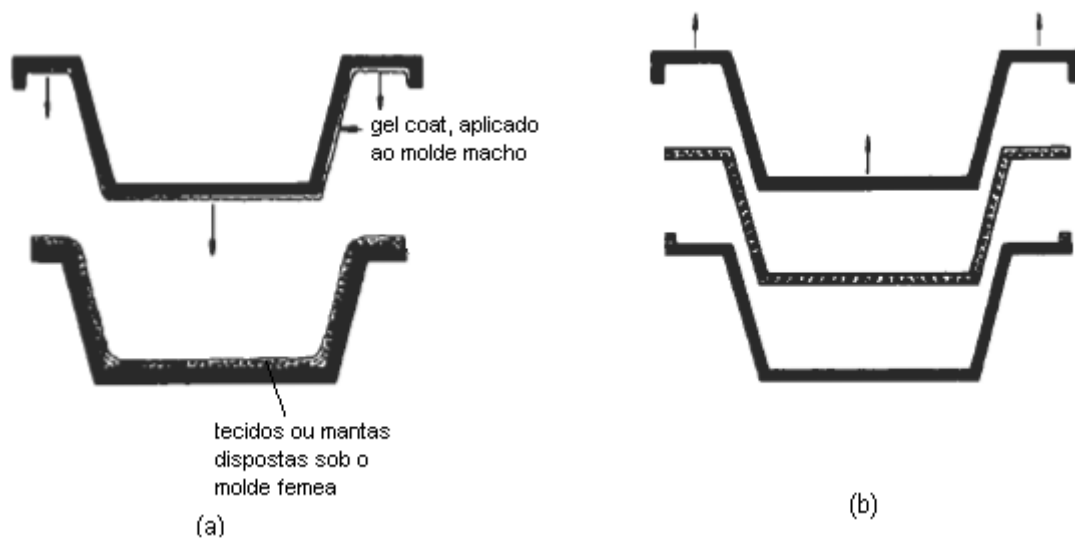


Fonte: (MAZUMDAR, 2002)

Figura A6 - Processo SRIM

Moldagem por compressão

A moldagem por compressão pode ocorrer tanto a frio como a quente. Na compressão a frio a resina, já ativada, é vertida sob camadas de tecidos ou mantas, e quando da aplicação da pressão a mesma se espelha por todo o reforço. Neste processo não se utiliza grandes pressões e o tempo de ciclo fica entre 10 e 15 min. (CRAWFORD, 1998).



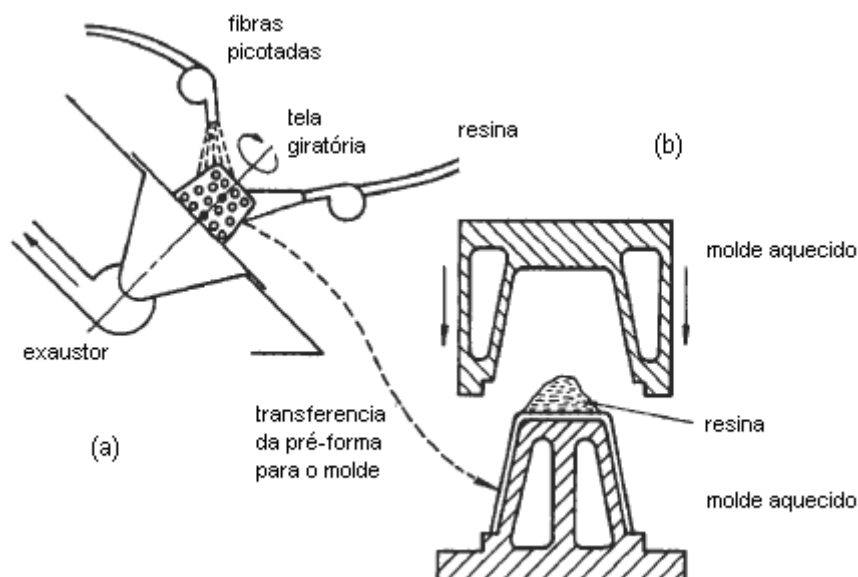
Fonte: (CRAWFORD, 1998)

Figura A7 - Processo de moldagem por compressão a frio: (a) preparação do molde antes da compressão; (b) molde aberto e retirada do moldado

A compressão a quente utiliza temperatura e pressão para acelerar o processo de cura. Este tipo de compressão é normalmente dividido em duas categorias (i) a moldagem de uma pré-forma e (ii) a moldagem por compressão, descritos a seguir.

- (i) Esta técnica é utilizada para a produção em massa e/ou para peças com uma maior complexidade. Este processo ocorre em dois

estágios distintos. No primeiro, a pré-forma é feita, por exemplo, com fibras picotadas jateadas sobre uma tela, com aplicação de vácuo para sustentá-las sob a mesma, seguido jateamento da resina, formando-se, assim, a pré-forma (Figura A8). No segundo passo, esta pré-forma, é levada a uma prensa, onde se coloca mais resina, e ocorre a compressão e o aquecimento até a cura da resina (CRAWFORD, 1998).



Fonte: (CRAWFORD, 1998)

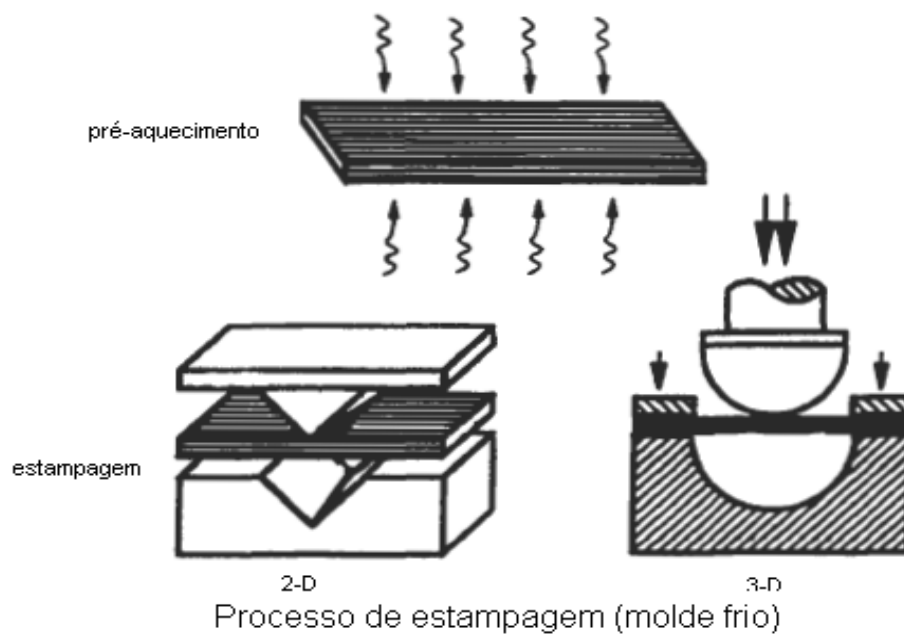
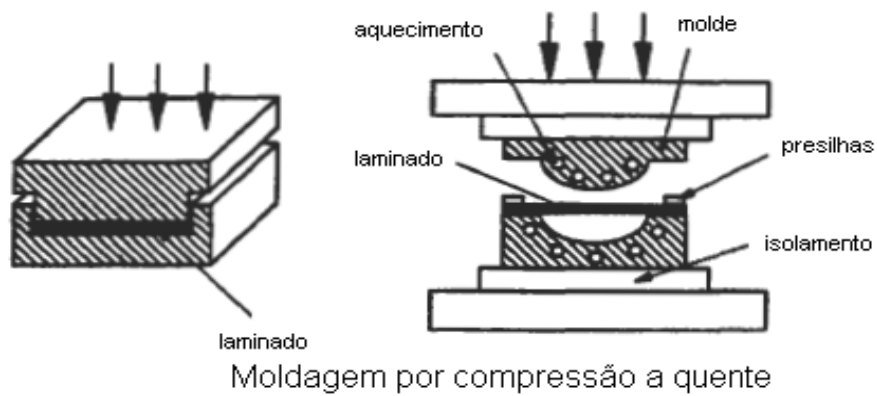
Figura A8 - Processo de moldagem a quente com pré-forma: (a) preparação da pré-forma, e (b) processo de compressão

- (ii) Moldagem por compressão: SMC (*Sheet Molding Compound*) – neste processo primeiro é produzido uma lâmina com a superposição de camadas de fibras na forma de mantas e/ou picotadas, pré-impregnadas com resina, cargas, pigmentos e catalisadores, tornando-se pronto para a moldagem. Para isto é necessário apenas

colocar um pedaço do SMC em uma prensa com aquecimento e comprimi-lo até que todas as dimensões do molde sejam atingidas. A vantagem deste processo está no fato de ser considerada uma moldagem a seco, tendo em vista que não há derramamento de resina durante o processo (CRAWFORD, 1998).

DMC (*Dough Molding Compound*) também conhecido como BMC (*Bulk Molding Compound*) – neste processo se prepara primeiro uma massa que é formada pela mistura fibras picotadas, resina, pigmentos e cargas. Esta massa é então colocada na prensa sendo comprimida até atingir todas as dimensões do molde e aquecida normalmente com temperatura entre 120 e 160°C, até a cura do material (CRAWFORD, 1998).

Outros tipos de moldagem por compressão e moldagem por estampagem são mostrados na Figura A9.



Fonte: (CRAWFORD, 1998)

Figura A9 - Moldagem por compressão a quente e estampagem

Moldagem por Injeção de Resina

É um processo que utiliza molde refrigerado e baixas pressões. Primeiro ocorre à preparação do molde (com aplicação de agentes desmoldantes e *gel coat*) para em seguida se colocar o reforço fibroso na metade inferior do molde. Posteriormente a parte superior do molde e colocada e a resina ativada é injetada dentro da cavidade do molde (CRAWFORD, 1998).

Processo *Roll Wrapping*

É similar ao processo de *hand lay-up* com fibras pré-impregnadas (como no caso do *vacuum bag moulding*), sendo que neste caso o molde é cilíndrico ou em forma de vela. As fibras pré-impregnadas são enroladas sobre um mandril removível, e então, sobre elas é colocado um filme que tem por função pressioná-las até que ocorra todo o processo de cura. Este processo é muito utilizado para a produção de tacos de golfe, quadros de bicicletas e outras formas tubulares (MAZUMDAR, 2002).

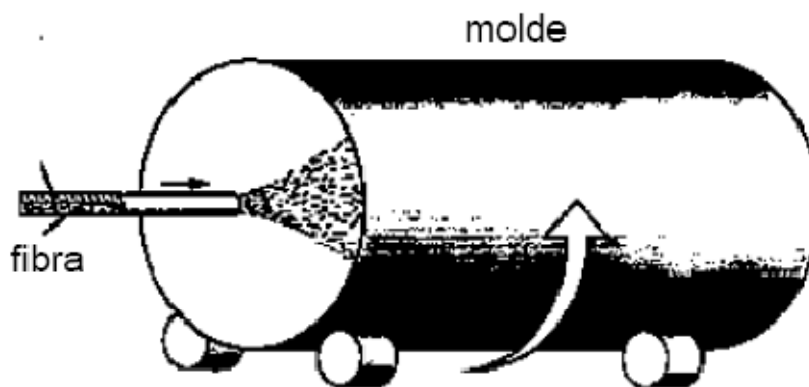
Moldagem em Autoclave

Normalmente é utilizado para a produção de compósitos laminados para indústria aeroespacial, tendo em vista que neste processo se consegue um produto de alta qualidade e com grande controle na moldagem. Para tanto tecidos pré-impregnados com resina são cuidadosamente arranjados em camadas (este arranjo irá determinar o grau de anisotropia do artigo moldado) dentro do molde e coberto com folhas de materiais que irão facilitar a saída de ar e o excesso de resina. Em seguida o material é lentamente comprimido por uma bolsa com o auxílio de bomba de vácuo, até se chegar às dimensões desejadas, só então o material é levado para uma autoclave onde ocorre a cura (CRAWFORD, 1998).

Moldagem por centrifugação

Este processo é utilizado na produção de peças de revolução. Dentro do molde em movimento de rotação são injetadas as fibras cortadas juntamente com a resina (Figura A10). A impregnação da resina nas fibras e a compactação é feita pelo efeito de centrifugação. A cura da resina pode ser

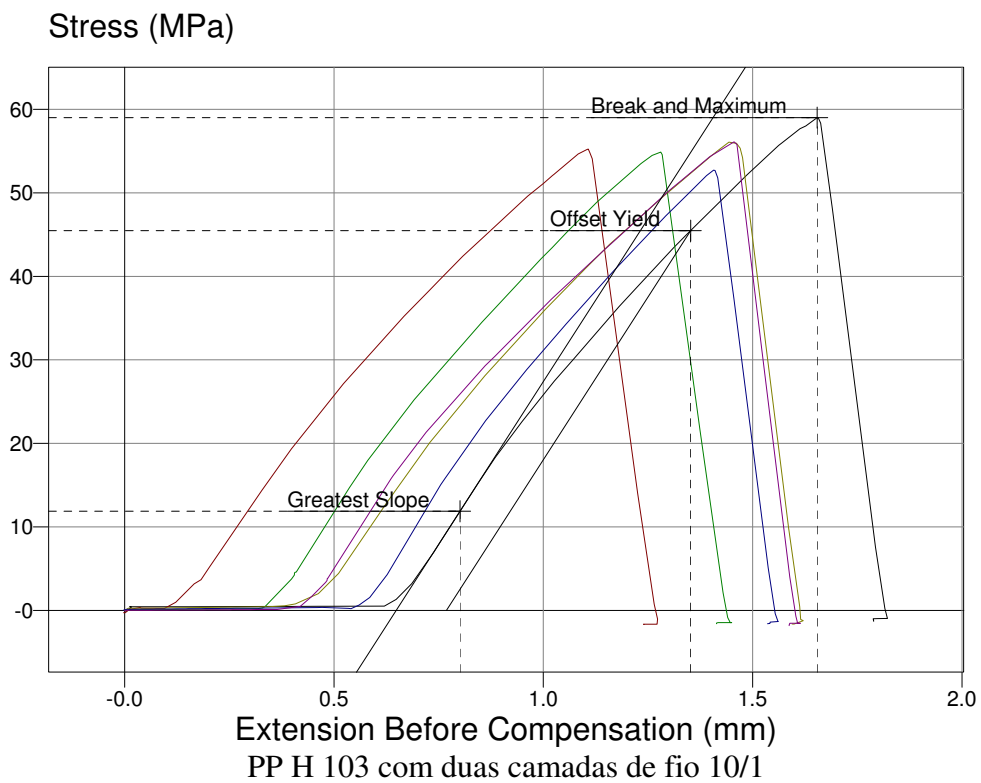
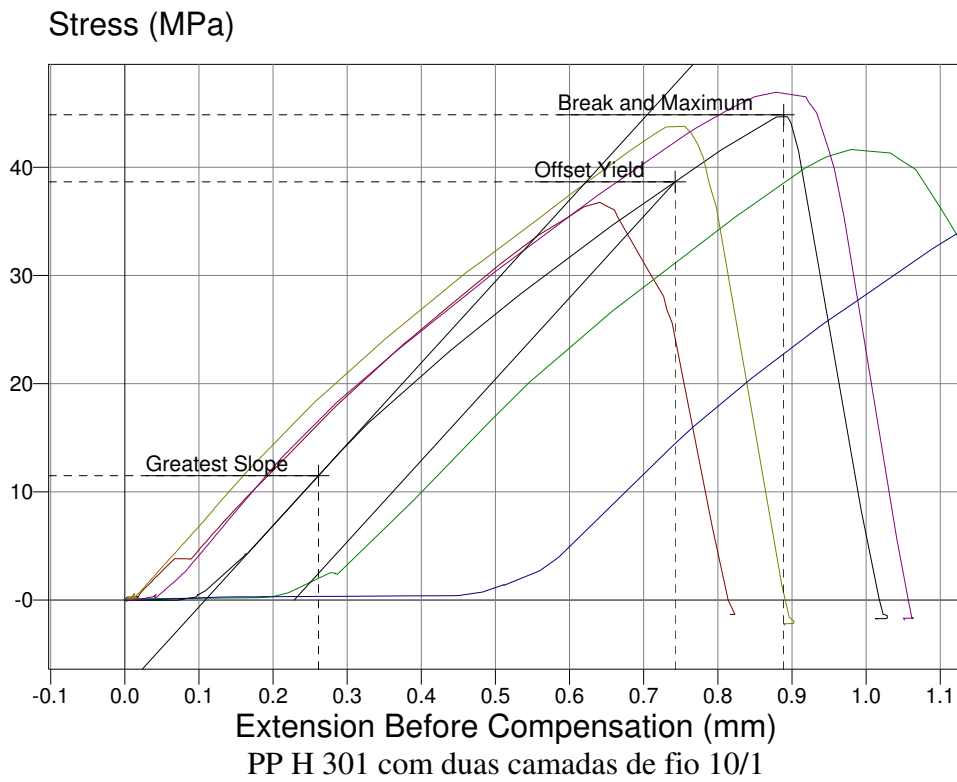
feita a temperatura ambiente ou em uma estufa. Este processo é utilizado em casos onde não se exige homogeneidade das propriedades mecânicas da peça (PEREIRA, 2003). Este processo é utilizado na produção de postes para iluminação,

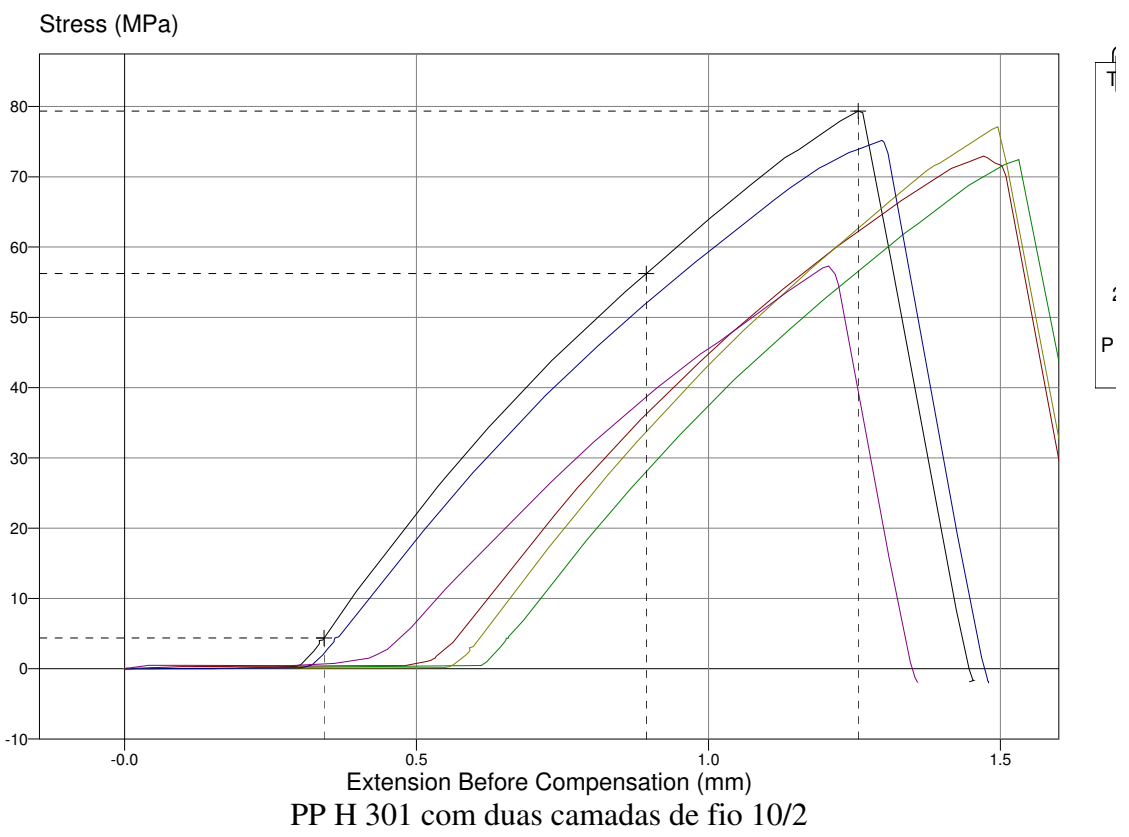
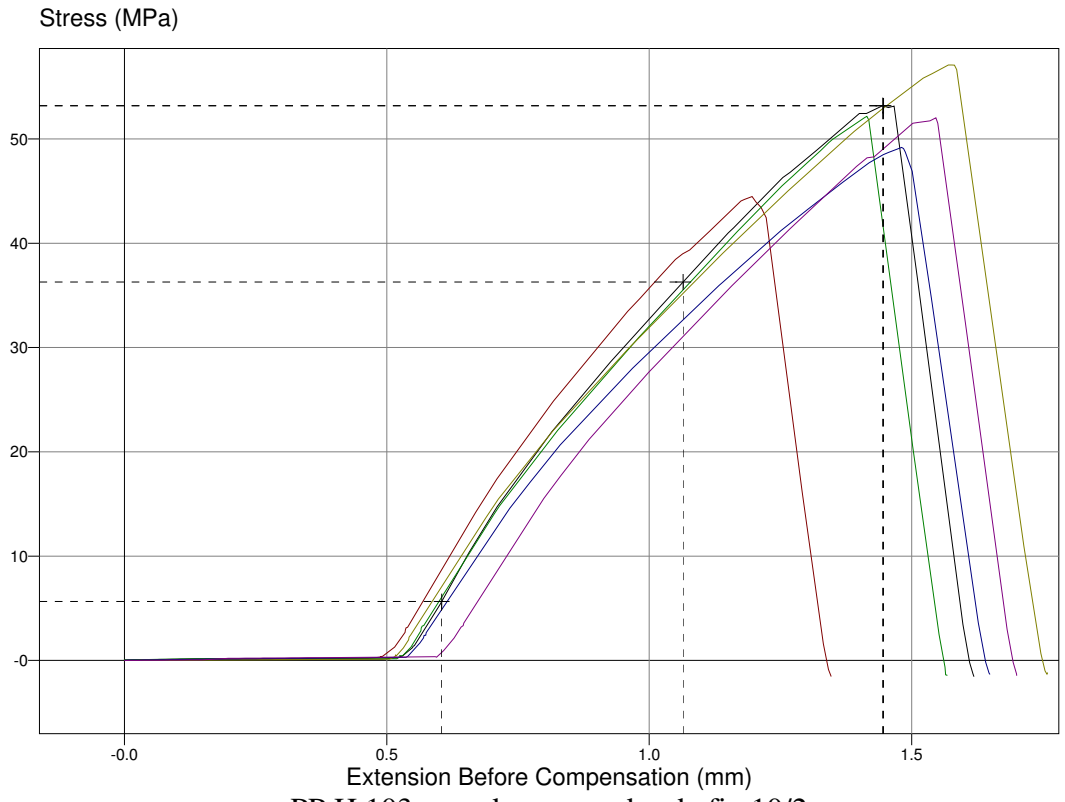


Fonte: (PEREIRA, 2003)

Figura A10 - Moldagem por centrifugação

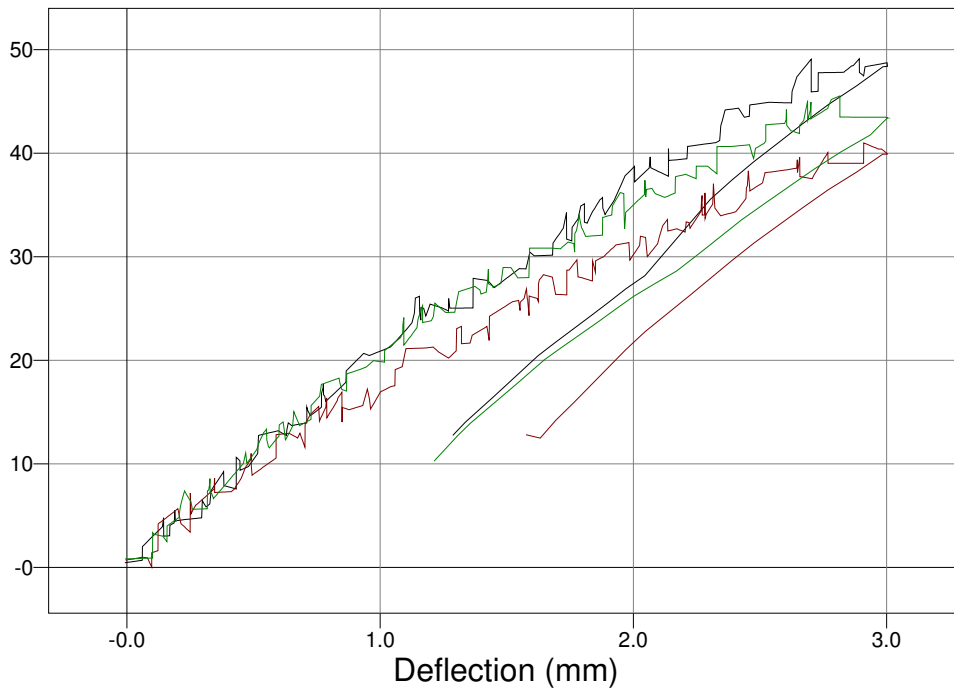
CURVAS TENSÃOxDEFORMAÇÃO EM TRAÇÃO





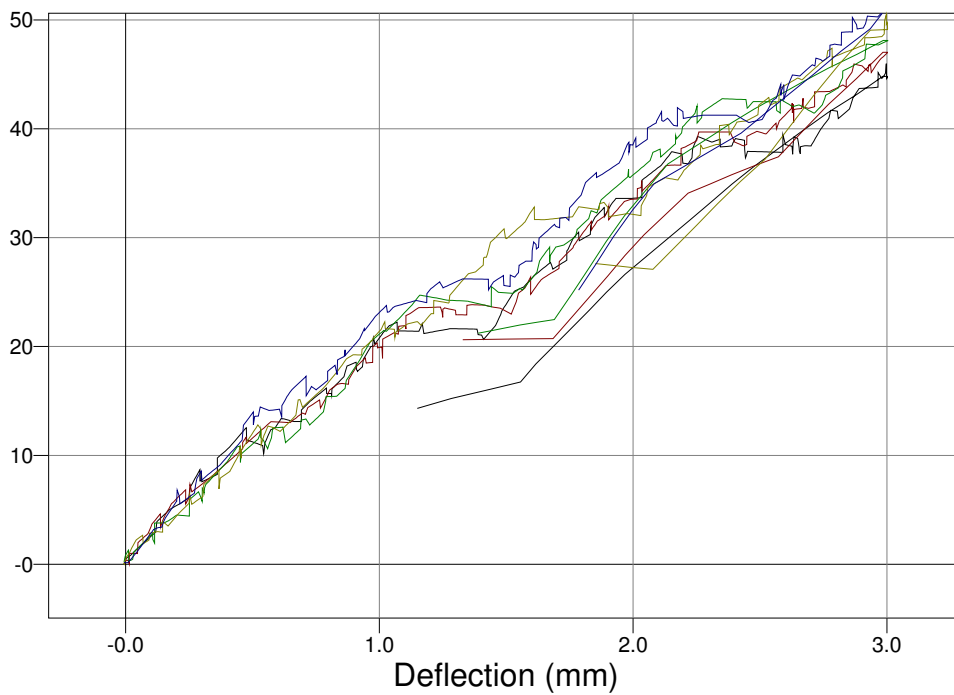
CURVAS TENSÃOxDEFORMAÇÃO EM FLEXÃO

Maximum Bending Stress (MPa)



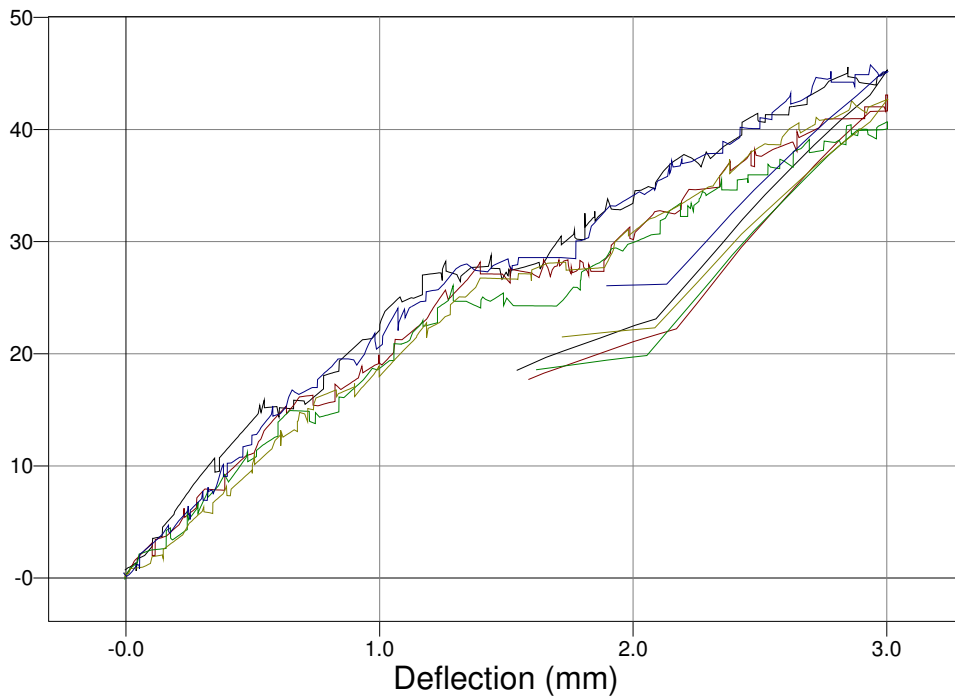
PP H 103 com duas camadas de fio 10/1

Maximum Bending Stress (MPa)



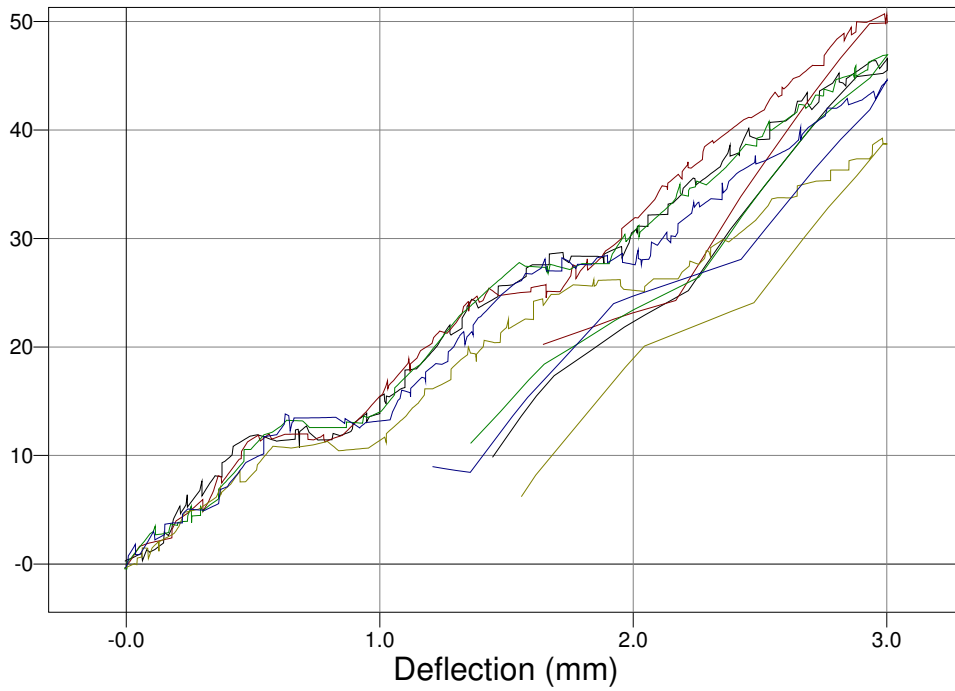
PP H 301 com duas camadas de fio 10/1

Maximum Bending Stress (MPa)



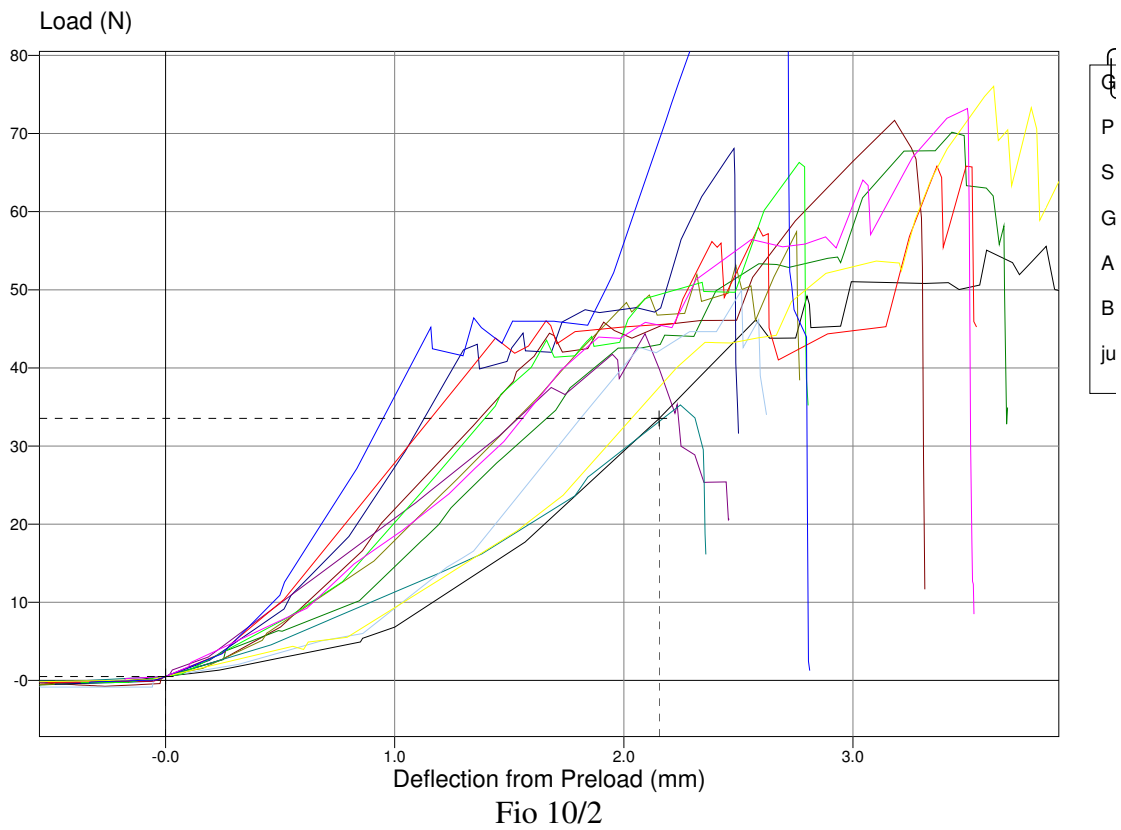
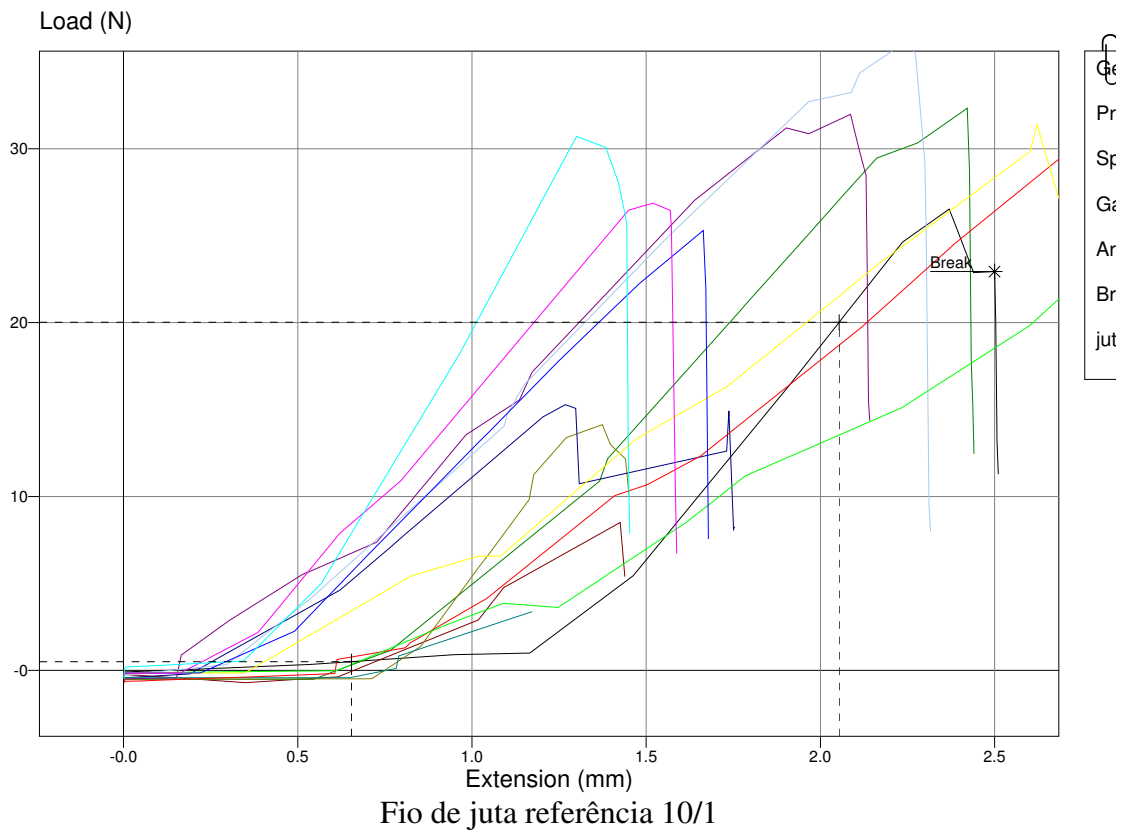
PP H 103 com duas camadas de fio 10/2

Maximum Bending Stress (MPa)



PP H 301 com duas camadas de fio 10/2

CURVAS CARGAxDEFORMAÇÃO EM TRAÇÃO PARA OS FIOS 10/1 E 10/2



CURVAS CARGAxDEFORMAÇÃO PARA O PP H 103 E PP H 301 EM TRAÇÃO

