

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
POLIÉSTER/TECIDOS DE JUTA (TRICOTADO E
TRAMADO)**

JOSELITO MEDEIROS DE FREITAS CAVALCANTE

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

MAIO - 2001

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
POLIÉSTER/JUTA REFORÇADOS POR TECIDOS TRICOTADOS E
TRAMADOS**

Joselito Medeiros de Freitas Cavalcante

Dissertação Apresentada ao Curso de Mestrado
em Engenharia Química da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento as exigências para
obtenção do Grau de Mestre

Área de Concentração: Tecnologia de Materiais Não-Metálicos

Orientadora: Prof.a Dra. Laura Hecker de Carvalho

Campina Grande – Paraíba

Maio – 2001



C376p

Cavalcante, Joselito Medeiros de Freitas

Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/Tecidos de Juta (Tricotado e Tramado)/ Joselito Medeiros de Freitas Cavalcante – Campina Grande: UFPB, 2001.

95p.: il

Dissertação (mestrado) UFPB/CCT/DEQ

Inclui bibliografia

- | | |
|---------------------------|----------------------|
| 1. Compósitos Poliméricos | 2. Poliéster |
| 3. Tecidos de Juta | 4. Modelo Matemático |

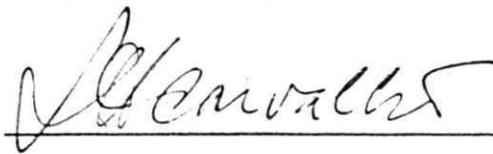
I. Título

CDU: 678.7

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIÉSTER/TECIDOS
DE JUTA (TRICOTADO E TRAMADO)**

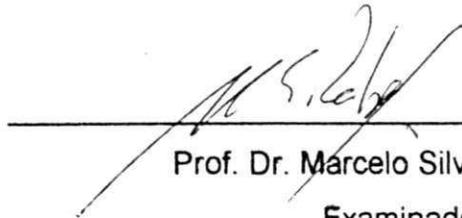
Joselito Medeiros de Freitas Cavalcante

Dissertação defendida e aprovada, em 21 de maio de 2001, pela banca examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof.ª. Laura Hecker de Carvalho, Ph.D

Orientadora



Prof. Dr. Marcelo Silveira Rabello

Examinador



Prof.ª. Dr. José Wallace Barbosa Nascimento

Examinador – Externo

Campina Grande - Paraíba

Maio - 2001

AGRADECIMENTOS

À DEUS pela ajuda e apoio em todos os momentos;

À Profa. Dra. Laura H. de Carvalho, pela orientação, revisão, sugestão, "puxões de orelha", durante a realização deste trabalho;

Aos meus pais Seu Freitas e Dona Marlene, pelo apoio logístico, financeiro, espiritual, emocional, em fim, por tudo;

A minha namorada, Claudenice, pelo apoio e alegria e ajuda no *abstract*;

À dona Lulu, que com afinho e com uma paciência gigantesca fez os tecidos tricotados;

Aos meus amigos, Angelo, Beethoven, Neilton e André, que mesmo distantes nunca negaram apoio;

Aos amigos do mestrado, Drailton, Elba, Sharline, Lucimar, Wilma, Cristiane, Joelma, Zora, Suelândia, Franklin, Múcio e Romualdo, muito obrigado pelas grandes comemorações;

A D. Maria José e Maricé, por toda ajuda e auxílio;

Ao pessoal do Laboratório de Materiais pela cooperação;

À Resana pela doação da resina;

A Cia. Têxtil Castanhal, pela doação das fibras e do tecido tramado de juta;

E a todos aqueles que eu não me lembrei quando estava fazendo estes agradecimentos, e que contribuíram para a realização deste trabalho, Muito Obrigado à Todos.

E, por último, mas não menos importante, à CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.2 COMPÓSITOS	5
2.2.1 Classificação dos Compósitos	5
2.3 MATRIZ POLIMÉRICA.....	6
2.3.1 Resina Poliéster	7
2.4 FIBRAS VEGETAIS	10
2.4.1 Fibra de Juta	11
2.5 INTERFACE MATRIZ FIBRA.....	14
2.6 COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRA DE JUTA	15
2.7 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS.....	17
2.8 MODELAGEM MATEMÁTICA	18
2.8.1 Introdução	18
2.8.2 Método	18
2.8.3 O princípio da metodologia	25
CAPÍTULO III.....	28
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA	28
CAPÍTULO IV	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Materiais	35
3.2 Métodos	36
3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA	38
3.3.1 Métodos	38
CAPÍTULO V	39

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Tecidos Tricotados	40
5.2 Tecidos Tramados	50
5.3 Tecido Tricotado x Tecido Tramado	54
5.4 Resistência ao Impacto – Tecido Tramado x Tricotado	59
5.5 Pós-cura	61
5.6 Modelagem Matemática	62
CAPÍTULO VI	67
6.0 CONCLUSÕES	67
6.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	69
CAPÍTULO VII	70
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE SÍMBOLOS

E – Módulo de elasticidade

G – Módulo de cisalhamento

S_{11} – Componente da matriz compliance, com esforço e deformação em relação ao eixo 1

S_{12} - Componente da matriz compliance, com esforço na direção do eixo 1 e deformação no eixo 2

σ - Tensão normal

ν - Coeficiente de Poisson

γ - Deformação específica de cisalhamento

ε - Deformação específica normal

τ - Tensão de cisalhamento

θ - Ângulo que determina a posição do tecido em relação ao esforço aplicado

1, 2 e 3 – eixos de orientação do ensaio

x, y e s – eixos de orientação do reforço

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação simbólica e esquemática do processo de cura do poliéster insaturado.....	9
Figura 2 – Tecidos de juta.....	36
Figura 3 – Comportamento da Tensão na Ruptura em função dos ângulos de ensaio, para compósitos com apenas uma camada de tecido tricotado e teor médio de fibra de $22,70\% \pm 4,76\%$	43
Figura 4 – Comportamento do Módulo Elástico em função dos ângulos de ensaio, para compósitos com apenas uma camada de tecido tricotado e teor médio de fibra de $22,70\% \pm 4,76\%$	45
Figura 5 - Comportamento do Alongamento em função dos ângulos de ensaio, para compósitos com apenas uma camada de tecido tricotado e teor médio de fibra de $22,70\% \pm 4,76\%$	46
Figura 6 - Propriedades dos compósitos com duas camadas em relação à matriz, com teor de fibra de $40,95 \pm 0,78 \%$	48
Figura 7 - Propriedades dos compósitos com três camadas em relação à matriz, com teor de fibra de $46,93 \pm 1,70 \%$	49
Figura 8 – Comportamento da Tensão na Ruptura em função do teor de fibra e dos ângulos de ensaio 0, 45 e 90°.....	52
Figura 9 – Comportamento da módulo de elasticidade em função do teor de fibra e dos ângulos de ensaio 0, 45 e 90°.....	53
Figura 10 – Comportamento do alongamento em função do teor de fibra e dos ângulos de ensaio 0, 45 e 90°.....	54
Figura 11 – Comportamento da tensão na ruptura em função do teor de fibra para os tecidos tricotados e tramados a: (a) 0°; (b) 45° e (c) 90°.....	55
Figura 12 - Comportamento do módulo elástico em função do teor de fibra para os tecidos tricotados e tramados a: (a) 0°; (b) 45° e (c) 90°.....	58
Figura 13 – Comportamento da componente S_{11} para os diversos ângulos.....	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Características e propriedades da fibra de juta.....	16
TABELA 2	Efeito do teor de fibra (em peso) e do ângulo de ensaio nas propriedades de compósitos poliéster/tecido tricotado de juta com apenas uma camada de tecido.....	51
TABELA 3	Efeito do teor de fibra (em peso) e do ângulo de ensaio nas propriedades de compósitos poliéster/tecido tricotado de juta, com duas camadas de tecido.....	52
TABELA 4	Efeito do teor de fibra (em peso) e do ângulo de ensaio nas propriedades de compósitos poliéster/tecido tricotado de juta, com três camadas de tecido.....	52
TABELA 5	Valores de Tensão na ruptura, módulo elástico e alongamento para tecidos tramados em função do teor de fibra e do ângulo de ensaio.....	63
TABELA 6	Resistência ao impacto para tecidos tramado e tricotados.....	73
TABELA 7	Comparação entre os compósitos com e sem pós-cura.....	76
TABELA 8	Valores teóricos para S_{11} em função do ângulo e do coeficiente de Poisson, para 0,4, 0,5 e 0,6mm de deformação.....	78
TABELA 9	Valores experimentais para S_{11} em função do ângulo e da deformação.....	80
TABELA 10	Variação dos valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} em função das deformações.....	82

RESUMO

Neste trabalho, as propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo elástico, alongamento e resistência ao impacto) de compósitos de matriz poliéster reforçados por tecidos de juta, tricotado e tramado, foram avaliadas em função da arquitetura do tecido. O efeito do tratamento de pós-cura, para os compósitos com tecidos tricotados, também foi avaliado. Aplicou-se a metodologia matemática, desenvolvida por Gommers, na qual se pode ter, a partir de ensaios de tração, os valores consistentes para todos os módulos elásticos e de cisalhamento. Os resultados mostraram que os compósitos com tecido tricotado apresentaram resistência à tração e alongamento menores que os da resina poliéster enquanto, o módulo elástico, foi superior ao da matriz em todos os casos estudados. O teor ótimo de fibra para os compósitos reforçados com tecido tricotado está próximo dos 40%, em peso. Os compósitos reforçados por tecidos tramados, apresentaram resistência à tração menor do que a matriz para um teor de fibra de 26% (duas camadas de tecido), enquanto, os reforçados por quatro camadas de tecido (38%, em peso) apresentaram resistência à tração superior. Em todos os casos o módulo elástico foi superior ao da matriz e o alongamento menor. Em geral os compósitos reforçados com tecidos tramados apresentaram propriedades superiores às dos compósitos reforçados por tecidos tricotados, entretanto estes últimos apresentaram uma maior resistência ao impacto. Quanto à metodologia matemática, os resultados obtidos se mostraram bastante consistentes, coincidindo os valores experimentais com os teóricos. Os seguintes resultados foram obtidos para os módulos elásticos: E_{xx} entre 0,894 e 0,693 GPa; E_{yy} entre 0,717 e 0,389 GPa; E_{xy} entre 3,314 e 2,564 GPa; e o módulo de cisalhamento, G entre 0,539 e 0,352 GPa.

ABSTRACT

In this work , the mechanical properties of the composites (polyester resin /jute, knitted and warped) were analysed in function of the architecture of the fabric ,as well as the effect of the pos-cure treatment under the knitted cloths. For obtaining the consistent values for all the elastic modules, it was applied the mathematical methodology developed by Gommers. The results have showed that the composites with knitted fabric have presented tensile strength and levels of deformation lower than the polyester resin while elastic modulus were superior to the matrix in all the analysed cases. The best properties were observed with a content of 40% (weight) fibre. The composites reinforced with the weave fabric, have showed lower tensile strength in relation to the matrix in which the content of fibre was 26% (two layers of fabric) while those ones reinforced by 4 layers (38%,weight) have showed a higher tensile strength. In all cases the elastic modulus was superior to the matrix and the deformation was lower . In general, the composites reinforced with warped cloths have demonstrated superior properties in relation to the composites reinforced with knitted cloths. Although the latter ones showing more resistance to impact . Concerning the mathematical methodology, the results obtained were quite consistent, coinciding the experimental values with the theoretical ones. The following results for elastic modulus were: E_{xx} between 0,894 and 0,693 GPa; E_{yy} between 0,717 and 0,389 GPa; E_{xy} between 3,314 and 2,564 GPa; and the shear module, G between 0,539 and 0,352 GPa.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

À medida que as aplicações tomam-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 (HAJE Jr., 1989). Na última metade deste século 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). Na Índia, por exemplo, tem-se utilizado compósitos poliéster/juta na construção de prédios (Madras-House, 1978) e ainda em elevadores para transporte de grãos (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

As fibras naturais são classificadas de acordo com a sua origem. Podem ser provenientes de plantas, de animais ou de minerais. As provenientes das plantas ou vegetais são utilizadas como reforço em plásticos e, conforme a sua procedência, estão subdivididas em três grupos: a) do fruto (ex.: algodão, coco), b) da entrecasca ou do caule – muito usada em têxteis (juta, ramie, cânhamo); c) das folhas – ou fibras duras (sisal, banana, corauá) e d) gramíneas – curtas e rígidas (bambu, bagaço de cana-de-açúcar).

O uso das fibras vegetais como reforço em produtos comerciais, no entanto, é dificultado por fatores tais como: a) seção transversal irregular – o que dificulta sua utilização em processos têxteis mecanizados e b)

propriedades físicas e mecânicas extremamente variáveis, dependentes da origem geográfica, das condições climáticas durante o crescimento bem como das técnicas de processamento (GOWDA, NAIDU & CHHAYA, 1999), o que faz com que os compósitos por ela reforçados apresentem propriedades muito variáveis.

Apesar destas dificuldades, dentre as fibras vegetais mais utilizadas como reforço em plásticos está a juta. Esta apresenta um bom conjunto de propriedades mecânicas, disponibilidade e baixo custo, se mostrando como uma das mais promissoras e de grande uso comercial, podendo ser um bom substituto para as fibras convencionais em muitas situações (BATISTA, 1995).

As fibras de juta são aplicadas aos plásticos de várias formas: como fibras curtas em compósitos injetados; como fibras longas e contínuas em compósitos pultrusados; na forma de tecidos em compósitos feitos por *hand lay up* e por compressão.

O tecido mais utilizado para este fim é o tramado. Entretanto nos últimos anos com o avanço da indústria têxtil, o uso de outros tipos de tecido têm crescido, dentre estes pode-se destacar o tricotado. Os tecidos tricotados apresentam uma alta extensibilidade o que permite a confecção de peças com formatos complexos, e também permite um incremento na resistência ao impacto do compósito. Estes também apresentam baixo custo e alta produtividade. Os tecidos tramados têm ao seu favor uma maior resistência à tração, devido ao alinhamento de suas fibras.

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem da natureza dos seus componentes individuais, tipo, teor e orientação do reforço e, inclusive, condições de processamento. Quando tecidos são utilizados como reforço, deve-se também considerar as características do tecido tais como: a) a sua arquitetura; b) os pontos empregados; c) as propriedades mecânicas dos tecidos na direção da trama e da urdidura para os tecidos tramados ou das carreiras (*course*) e dos cordões (*wale*) para os tecidos tricotados (TAN, TONG & STEVEN, 1999).

Com o desenvolvimento dos diversos tipos de tecidos (tramados e os tricotados) e o espaço que estes vem ganhando nos últimos anos no setor industrial, se faz necessário que pesquisas sejam desenvolvidas para a

predição do comportamento das propriedades, principalmente a mecânica, de compósitos têxteis. Recentemente muitos pesquisadores tem contribuído para o desenvolvimento em análise de elementos finitos e análise de modelos teóricos para a predição das propriedades mecânicas dos compósitos têxteis, e para estudar a tendência da variação das propriedades mecânicas com os parâmetros da arquitetura (TAN, TONG & STEVEN, 1999). Dentre estes métodos de predição de propriedades mecânicas, existe a desenvolvida por GOMMERS (1998), na qual através de simples ensaios de tração é possível se chegar a valores consistentes de módulo de elasticidade, bem como encontrar os valores para o módulo de cisalhamento.

Este trabalho tem por objetivo, estudar as propriedades mecânicas em tração e impacto para compósitos poliéster/tecido de juta em função: do teor de fibra, da arquitetura dos tecidos utilizados como reforço, da direção de ensaio, e, avaliar o efeito da pós-cura nos compósitos reforçados por tecido tricotado. Aplicar a metodologia desenvolvida por Gommers (1998), para compósitos reforçados por tecidos tricotados. Os dados teóricos e experimentais foram comparados, o que permite estabelecer se há consistência dos dados obtidos para o módulo elástico e determinar o módulo de cisalhamento.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

A busca incessante de materiais capazes de atender novas demandas tecnológicas tem levado a obtenção de novos materiais. Estes são obtidos com a conjugação de materiais já existentes. Mais recentemente compósitos estruturais para aplicação na indústria automobilística, aeroespacial, naval e em materiais esportivos, tais como esquis, tacos de golfe e raquete de tênis (GIBSON, 1994), vem sendo desenvolvidos.

Em se tratando de plásticos, a fibra mais utilizada como reforço é a fibra de vidro. Sendo que a do tipo E, a mais comum, apresenta boas características elétricas, boas propriedades mecânicas, resistência ao calor, à água e ácidos. Apresenta, também, uma grande versatilidade na sua aplicação sendo utilizada tanto em termoplásticos quanto em termorrígidos (GUEDES & FILKAUSKAS, 1991). Após o surgimento das fibras de vidro surgiram outras fibras sintéticas, dentre elas destacam-se as de carbono, boro e Kevlar (BLASS, 1988), entretanto, estas últimas, são bem mais caras que as fibras de vidro e por isso sua utilização restringe-se praticamente as aplicações aeroespaciais e desportivas onde a relação custo/benefício é justificada.

Uma alternativa, para a substituição da fibras sintéticas são as fibras naturais. Estas apresentam boas propriedades mecânicas (em alguns casos comparáveis as fibras de vidro), são baratas, leves, abundantes e são provenientes de fontes renováveis.

2.2 Compósitos

Um material compósito (ou conjugado) consiste de dois ou mais materiais fisicamente distintos, os quais são combinados de forma a se conseguir um produto que apresente propriedades combinadas dos materiais em questão (POWEL, 1983).

2.2.1 Classificação dos Compósitos

As propriedades dos compósitos são uma função, dentre outras, das propriedades das fases que os constitui e da geometria da fase dispersa. A geometria da fase dispersa se relaciona principalmente com a forma, tamanho, distribuição e orientação do reforço (QUIRINO, 1997).

As características do reforço (fase dispersa) que tem maior influencia sobre as propriedades dos compósitos são: a sua constituição química, tamanho e razão de aspecto (razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra, L/D, respectivamente). A adesão entre os componentes de um compósito têm uma importância primordial para que o reforço possa exercer sua função de forma efetiva e os esforços aplicados, divididos entre as duas fases (RICHARDSON, 1977).

Desta forma, os compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de reforço/carga, em:

a) Compósitos fibrosos

Caracterizados por apresentar reforços com elevada razão de aspecto. As fibras (curtas ou longas) podem ser utilizadas de forma unidirecional, bidirecional ou aleatória, produzindo compósitos com diferentes propriedades.

b) Compósitos particulados

Consistem de compósitos reforçados por partículas de razão de aspecto próximo de 1, dispersas na matriz. Neste caso, em geral, não se tem uma melhora nas propriedades mecânicas do compósito.

c) Compósitos mistos

São compósitos onde o tipo de reforço consiste da mistura de uma carga fibrosa e uma particulada.

Os compósitos podem ainda serem classificados de acordo com a natureza da matriz em: polimérico, cerâmico e metálico. Destes os mais comuns são os poliméricos, tanto com resina termoplástica quanto com termorrígida. Neste tipo de compósito o reforço mais utilizado são as fibras cerâmicas, dentre elas destaca-se a de vidro. Os compósitos poliméricos reforçados por fibras apresentam uma alta anisotropia, pois a matriz é mais fraca e menos rígida do que a fibra. Mais recentemente, se começou a estudar os compósitos com matriz metálica, como por exemplo, alumínio reforçado com partículas ou fibras curtas cerâmicas, ou ainda o titânio contendo fibras longas e com grandes diâmetros. As melhorias nas propriedades buscadas nestes casos, são algumas vezes, menos pronunciadas do que para aqueles com matrizes poliméricas, entretanto, com este tipo de reforço tem-se um aumento na temperatura de uso do compósito. O estudo de compósitos de matriz cerâmica, tem por objetivo básico modificar a rigidez e a resistência da matriz, com a adição de outros componentes (HULL & CLYNE, 1996).

2.3 MATRIZ POLIMÉRICA

Várias resinas termoplásticas e termofixas têm sido utilizadas como matrizes em compósitos, devido ao fato de exibirem excelentes propriedades mecânicas, boa resistência a solventes e suportarem temperaturas relativamente altas. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por termofixos (PAIVA, 1999).

Dentre as resinas termofixas as mais utilizadas são epoxi, poliéster insaturado, fenólica e vinil éster. Estas cobrem uma faixa muito larga de substâncias químicas e uma larga escala de propriedades físicas e mecânicas. Nos polímeros termofixos, a resina líquida é convertida em sólido rígido por ligações químicas cruzadas, as quais conduzem à formação de uma forte rede tridimensional. Isto é normalmente feito quando o compósito está sendo formado (processo de cura). As propriedades mecânicas dependem das

unidades moleculares, da qual a rede tridimensional é formada, bem como do comprimento e densidade das ligações cruzadas. A forma é determinada pelos agentes químicos inicializantes utilizados e depois pelo controle das ligações cruzadas no processo de cura (HULL & CLYNE, 1996).

Uma das funções de uma resina polimérica em compósitos é dispersar ou aglomerar a fase reforçante, e quando submetida a uma carga deve deformar 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 limitada, inicialmente, ao nível de deformação que ela sofre em relação ao reforço, quando submetida a uma solicitação. A deformação da matriz deve ser compatível com a deformação máxima do reforço (HAGE Jr, 1989).

As resinas termoplásticas embora reduzam drasticamente o custo de fabricação do compósito, não tem sido usadas em compósitos avançados, pois tem como limite a temperatura de uso. A grande ênfase dos estudos atuais com relação as matrizes termoplásticas é desenvolver resinas termoplásticas com resistência térmica elevada (CAVALCANTI, 2000).

2.3.1 Resina Poliéster

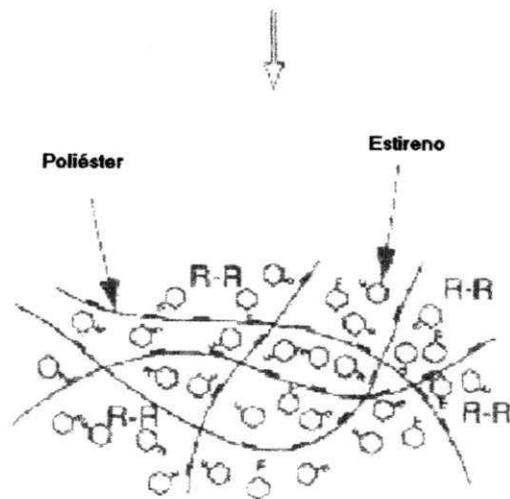
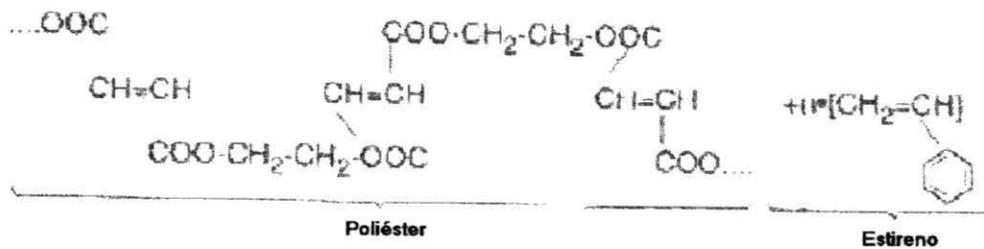
A elaboração da resina poliéster é feita em duas etapas distintas e sucessivas, a primeira é a poliesterificação, utilizada para a preparação do pré-polímero, ou seja do material semi-final pronto para o uso, a segunda, é a reação de reticulação, que ocorre durante a manufatura do produto final, esta reação ocorre por mecanismo radicalar em massa, onde pontes de poliestireno unem as cadeias do poliéster. O poliéster insaturado representa aproximadamente 2% do consumo total de polímeros e isto se deve à sua alta flexibilidade de adaptação tanto como material semi-final quanto pelas propriedades do produto acabado. Este tipo de resina permite a realização tanto de trabalhos artesanais quanto dos que envolvem automação total e permite, a confecção de peças, de grande e pequenas dimensões. Além disto podem ser utilizadas em diversas formas de moldagem, tais como: por compressão, injeção, transferência, ou *hand lay up*, dentre outros. Sua

composição pode ser modificada para se ter um produto borrachoso ou um extremamente rígido. Apresenta certa transparência, resistência às intempéries, ao fogo e agentes químicos. São facilmente reforçáveis, principalmente por fibra de vidro. A resina poliéster tem inúmeras aplicações, sendo aplicada desde a indústria automotiva até em fábricas de verniz (DAVIAUD & FILLIATRE, 1983).

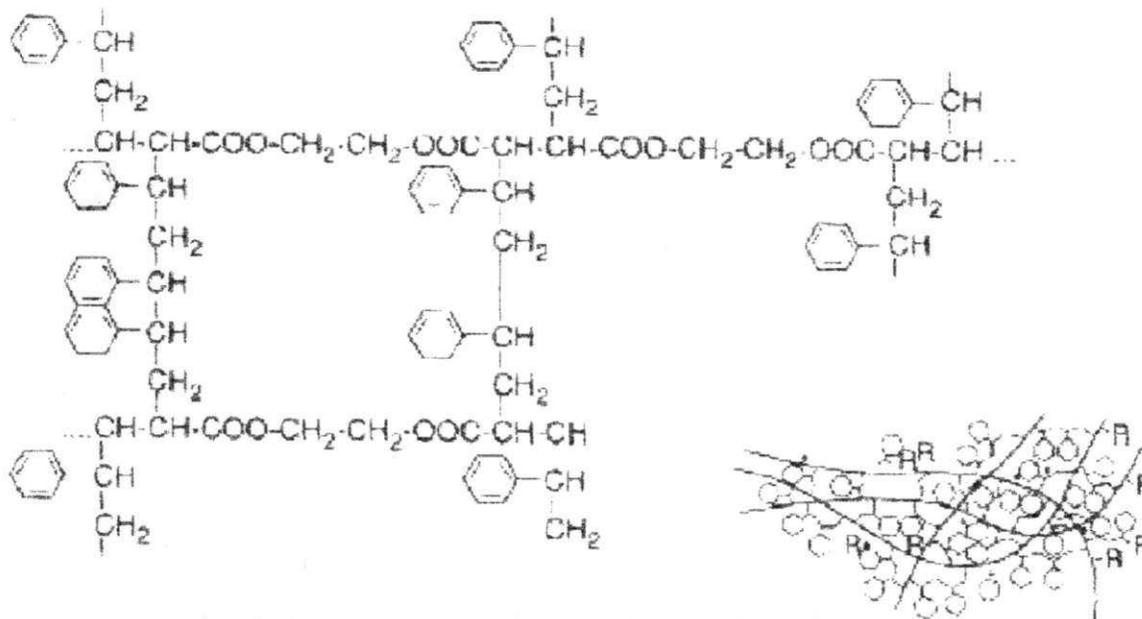
O poliéster insaturado é obtido pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um diol, resultando num produto, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluído em um monômero vinílico, inibido, para facilitar sua utilização. Inicialmente encontra-se no estado líquido e após a adição do agente de cura, ocorre a transformação para o estado sólido.

No poliéster comercial o ácido insaturado é o ácido fumárico ou o anidrido maleico, o ácido saturado é o ácido ou o anidrido ftálico, e o diol utilizado é o propileno glicol. Cada um desses componentes apresentam uma função básica na obtenção da resina poliéster. O ácido insaturado fornece os pontos reativos para as ligações cruzadas; o ácido saturado determina o grau de espaçamento ou concentração das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia do poliéster, e o glicol, proporciona os meios para a esterificação e a ponte entre os ácidos para formar o polímero (COSTA, 1997).

Na Figura 1, tem-se a representação esquemática da reação de cura do poliéster insaturado (OSSWALD & MENGES, 1996).



Representação simbólica e esquemática do poliéster insaturado não-curado



Representação simbólica e esquemática da reação de cura do poliéster insaturado

Figura 1 – Representação simbólica e esquemática do processo de cura do poliéster insaturado

Durante a cura das resinas termorrígidas ocorre uma reação muito exotérmica. Com a adição do reforço, parte do calor é absorvido por estes, o que reduz o pico exotérmico de temperatura, melhorando, desta forma, a uniformidade da cura, e ainda, podem diminuir as tensões residuais do material. Também podem reduzir a degradação térmica, permitindo o uso e moldagem a temperaturas mais altas que podem resultar num ciclo de tempo de moldagem mais curto, maximizando sua eficiência. O tempo de cura é algumas vezes tomado como sendo o tempo para alcançar a cura exotérmica máxima. Para minimizar a duração da cura, o nível de conversão no molde precisa ser exatamente estimado ou monitorado (CAVALCANTI, 2000).

A dependência das propriedades de resinas termorrígidas com a composição e/ou o grau de cura não é facilmente generalizada. Propriedades típicas mudam com a pós-cura do poliéster podendo levar a aumentos no módulo elástico de até 30% e na resistência à tração em até 60%. Estes aumentos, no entanto, dependem do tipo de resina, condições de moldagem e de pós-cura, havendo quem não considere este processo vantajoso já que pode haver degradação da matriz (DE & WHITE, 1996).

Dentre as propriedades do poliéster destacam-se: o fácil manuseio, cura rápida sem a presença de materiais voláteis, a cor clara (leve), estabilidade dimensional e geralmente boas propriedades físicas e elétrica (DE & WHITE, 1996). Dentre as propriedades físicas, para os poliésteres comerciais, pode-se destacar (HULL & CLYNE, 1996): densidade entre 1,2 a 1,5 kg/cm³; módulo elástico entre 2,0 e 4,5 GPa; coeficiente de Poisson entre 0,37 e 0,39; resistência à tração entre 40,0 e 90,0 MPa e deformação máxima de 2%.

2.4 FIBRAS VEGETAIS

O uso de fibras naturais de origem vegetal para a produção de materiais compósitos data, provavelmente, do início da nossa civilização, quando se usava palha ou capim para reforçar tijolos de barro cru (GIBSON, 1994).

Num passado mais recente, a principal utilização das fibras vegetais era na produção de cordas, barbantes, roupas, capachos e produtos artesanais. Com o surgimento das fibras sintéticas o consumo das fibras vegetais teve uma

queda de cerca de 40% (D'ALMEIDA, 1987). Nos últimos anos, entretanto, devido a crise energética, o baixo grau de industrialização necessário para o processamento das fibras vegetais, sua abundância, baixo custo e os problemas causados pelo uso de fibras sintéticas ao meio ambiente, tem novamente despertado o interesse pelas fibras vegetais.

Entretanto, o uso das fibras vegetais como reforço para os plásticos, apresentam alguns problemas, dentre os principais pode-se destacar: baixo módulo de elasticidade, alta absorção de água, susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos, a baixa durabilidade das fibras em meio alcalino, variação das propriedades da fibra e dificuldade de adesão entre a fibra e a matriz (BLEDSKY & GASSAN, 1999).

As fibras vegetais são compósitos de fibrilas e microfibrilas em matrizes de lamelas e lamelas médias. O mecanismo de ligação das fibras é, portanto, mecânico e químico. A deterioração da fibra surge como resultado da perda de aderência química ou mecânica, ou seja, pela quebra das ligações de hidrogênio das moléculas celulares, da deterioração das microfibrilas e/ou fibrilas da fibro-célula ou deterioração das lamelas e/ou lamelas médias (TOLEDO, 1993).

As fibras vegetais são divididas da seguinte forma:

- fibras do talo (juta, linho);
- fibras das folhas (sisal, palma, henequém);
- fibras do fruto (côco, algodão) e
- fibras gramíneas (bambu, cana-de-açúcar).

Estes diversos tipos de fibras são constituídos principalmente de celulose e lignina, embora um número menor de componentes tais como graxas, pectina, sais inorgânicos, substâncias nitrogenadas, corantes, e outras de menor importância, sejam encontradas (NOBREGA, 2000).

2.4.1 Fibra de Juta

A juta é a segunda fibra (natural) mais consumida no mundo, perdendo apenas para o algodão, sendo empregada principalmente na fabricação de cordas, sacaria, esteiras e produtos afins. Ela obtida da haste da planta

Corchorus capsularis, cultivadas em áreas de inundação ou *Corchorus olitorius* cultivadas em áreas altas. (D'ALMEIDA, 1987; MORASSI, 1994).

A juta foi introduzida no Brasil por Riyota Oyama, a cultura foi feita inicialmente por japoneses, tornando-se a seguir uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica, sendo um fator fundamental da fixação de mais de 50 mil famílias ao campo (www.castanhal.com.br).

Dos dois tipos existentes a mais cultivada no Brasil, e a utilizada neste trabalho, é a juta (*corchorus capsularis*) 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 uma grossura de aproximadamente 20 mm, crescendo em climas úmidos e tropicais. A época de semear varia, segundo a natureza e o clima. As plantas florescem 4 a 5 meses depois de semeadas e inicia-se imediatamente a colheita. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo da maceração. As árvores cortadas rente ao solo por meio de foices, são limpas das folhas, postas em feixes dentro da água corrente ou parada. A alta temperatura das regiões nas quais é cultivada favorece a fermentação e desta forma se consegue a maceração em 8 a 10 dias. Tira-se assim facilmente a casca da planta e elimina-se da fibra a parte lenhosa do talo. Enxágua-se e empacota-se. 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 (www.castanhal.com.br).

O comprimento das células elementares da juta é em média de 0,80mm, e o diâmetro varia de 0,01 a 0,03 mm.

Ao se analisar quimicamente a juta utilizada neste trabalho, tem-se a seguinte composição (dados fornecidos pelo próprio produtor):

Cinza.....	0,70
Água.....	9,72
Gorduras Cerosas.....	0,36
Extrato aquoso.....	1,06
Celulose.....	64,10

Substâncias incrustantes.....24,06 = 100%

Dada a proporção centesimal das substâncias orgânicas da juta, tem-se:

Carbono.....46,30

Oxigênio.....47,60

Hidrogênio..... 6,10 = 100%

Através deste dados pode-se dizer que o principal componente da juta é a celulose, sob a forma de ligno-celulose.

A juta tem boa afinidade para corantes diretos e para corantes básicos. É muito higroscópica, regulando a umidade em 12%, o que a torna a matéria prima ideal para a sacaria, evitando tanto o ressecamento quanto a fermentação do produto acondicionado (www.castanhal.com.br).

Outras propriedades das fibras de juta estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características e propriedades da fibra de juta

Densidade	1,5 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

Quanto à resistência à tração, a fibra de juta apresenta uma alta variação, tendo valores na faixa de 240 a 550 MPa. Apresenta um módulo de elasticidade que varia na faixa de 17,4 a 32,0 GPa (TOLEDO, 1993). A dispersão destas propriedades esta relacionada com alguns fatores, tais como, época do plantio, solo, colheta, dentre outros.

A fibra de juta é relativamente inextensível, quando testada em fibra de comprimento curto (de 10mm), 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).

2.5 INTERFACE MATRIZ FIBRA

A interface apresenta uma importância fundamental na determinação das propriedades finais dos compósitos. A grande diferença entre as propriedades elásticas da matriz e da fibra devem ser transmitidas através da interface. A adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar o início de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho global do compósito.

Devido aos problemas de compatibilização interfacial de compósitos, foram desenvolvidos mecanismos para melhorar a qualidade da interface em compósitos de matriz polimérica. Estes mecanismos são o uso de agentes de acoplamento ou de modificações na superfície dos reforços ou das matrizes (HAGE, Jr., 1989).

Devido a falta de compatibilidade entre a fibra e a matriz, é que a maioria das falhas nos compósitos ocorrem na interface. Portanto, uma interface forte vai gerar um compósito forte. Para tanto, é necessário compatibilizar os componentes do compósito na interface, seja para aumentar a interação química entre as superfícies, seja para compatibilizar as tensões superficiais para que ocorra um melhor molhamento.

A adesão entre a fibra e a matriz pode ser atribuída a cinco mecanismos principais que podem ocorrer na interface isoladamente ou em combinação, quais sejam:

- 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 a quantidade 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 relacionada 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.

2.6 COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRA DE JUTA

As fibras de juta, vem sendo utilizadas como reforço em plásticos, principalmente em países como Índia e China. Devido a estas fibras apresentarem um baixo custo, elas estão substituindo as fibras sintéticas, principalmente as de vidro, em aplicações não-estruturais, isto é, em aplicações que não necessitem de altas propriedades mecânicas, tais como: telhas, silos para armazenamento de grãos, parede divisórias, caixas para instalações elétricas, dentre outras (MOHANTHY & MISRA, 1995).

A fibra de juta pode ser incorporada aos plásticos de diversas formas, como fibras curtas tanto em termoplásticos quanto em termorrígidos, como fibras

contínuas em termofixos no processo de pultrusão, ou na forma de tecidos em termofixo em processos como *hand lay-up* ou compressão.

Uma das formas de se aplicar a juta é como tecido, dentre os tecidos, o mais utilizado como reforço em plástico é o tecido tramado. Para compósitos tendo a juta como agente de reforço isto também é verdade. Entretanto, nos últimos com o avanço da indústria têxtil, vem se utilizando outros tipos de tecidos dentre eles destaca-se o tricotado (LEONG, 2000).

Os tecidos tramados são os mais comuns como reforço em plásticos e, dentre as fibras mais utilizadas para este fim estão as de vidro, de carbono e de aramida, principalmente em compósitos de alto desempenho (LEONG, RAMAKRISHNA, HUANG & BIBO, 2000).

Os tecidos tramados são produzidos pela tecelagem automática ou manual de fios. Os fios são dispostos alinhados verticalmente no urdume e, através de liços são divididos em dois grupos e elevados ou baixados para a passagem dos fios da trama (horizontais), prendendo-os. Os fios da trama são lançados entre os fios do urdume e compactados pela batida de um pente (TAN, TONG & STEVEN, 1999; MILLER, 1973; GEORGE, 1961). A densidade do tecido ou espaçamento entre os fios depende do pente utilizado e da força de batida do pente. Dependendo do padrão empregado tem-se diferentes padrões de tecidos, isto é, tecido simples (plain weave), tafetá, cetim, etc.. As propriedades mecânicas do tecido tramado são controladas principalmente por parâmetros tais como a arquitetura do tecido, natureza, dimensões e torção do fio e espaçamento entre os fios ou densidade do tecido.

Os tecidos tricotados são caracterizados pela interligação de um fio em laçadas (*loops*) utilizando-se agulhas de tricô. Neste tipo de tecido, uma série de pontos de tricô ou laçadas são interconectadas pela agulha que faz com que o fio passe através de uma laçada previamente efetuada para formar uma nova laçada. Numa estrutura tricotada, ao longo da largura do tecido, na direção horizontal, tem-se as carreiras (*courses*) de pontos e, na direção vertical, tem-se as colunas ou cordões (*wale*). As laçadas nas carreiras e nos cordões são interconectadas formando o tecido. Comparados a outros tipos de tecidos, os tecidos tricotados apresentam elevada produtividade, baixo custo e, principalmente, elevada elasticidade, o que permite um bom ajuste do tecido no

desenvolvimento de compósitos com formas complexas (TAN, TONG & STEVEN, 1999; WU, KOTAKI, FUJITA, HAMADA, INDA & MAEKAWA, 1993). A elevada elasticidade dos tecidos tricotados faz com que seu uso em compósitos gere produtos com resistência ao impacto superior à dos reforçados por tecidos tramados de mesma natureza. O uso de tecidos tricotados como reforço em polímeros, no entanto, é pouco difundido pois a resistência mecânica dos seus compósitos é bem inferior à dos reforçados por tecidos tramados podendo, inclusive, ser inferior à da matriz. Os principais motivos para isto são a arquitetura dos tecidos tricotados, que não possuem fibras alinhadas e cujas laçadas são interconectadas através de nós, o que faz com que o tecido seja mais grosso do que um tecido tramado, resultando em baixa fração volumétrica de fibras nos compósitos.

2.7 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS

Diversos processos são utilizados industrialmente para a obtenção de peças ou estruturas monolíticas de excelentes propriedades mecânicas e químicas, termicamente estáveis, leves e com formas arrojadas.

Dentre os processos de manufatura dos compósitos a base de resina termofixa, destacam-se (BLASS, 1988):

□ *Hand Lay-up*

Processo manual que consiste em se aplicar camadas alternadas de fibras, em forma de tecidos ou mantas, e resina no molde. A resina com o sistema de cura, é aplicada sobre as fibras com auxílio de um rolo ou pincel, que também possui a finalidade de eliminar as bolhas existentes. A cura tanto pode acontecer na temperatura ambiente como com aquecimento.

□ Pultrusão

Este processo produz compósitos com as fibras orientadas unidirecionalmente. Os filamentos contínuos são impregnados num banho de resina e então são forçados a passar por uma matriz com uma fenda de geometria desejada. Estufas são normalmente utilizadas, para assegurar uma perfeita cura e aumentar a velocidade do processo. O

reforço é unidirecional e direcionado na direção do fluxo.

□ Modelagem por compressão

Neste processo se utiliza molde de duas partes tipo macho-fêmea na fabricação de compósitos. O reforço pode ser utilizado na forma de mantas ou tecidos onde são alternados com a resina. A impregnação fibra-matriz é feita com a ajuda de uma espátula que também serve para retirar bolhas. O molde é fechado, e a cura ocorre enquanto o material está restrito as superfícies das duas partes (macho-fêmea) do molde. Geralmente o molde é aquecido para a realização da cura durante a compressão.

□ Modelagem por transferência de resina

Neste processo a resina líquida é colocada em uma câmara separada e posteriormente transferida sob pressão através de um corredor para o molde, onde ocorre a cura.

2.8 MODELAGEM MATEMÁTICA

2.8.1 Introdução

Em seu artigo intitulado "*Determination of Mechanical Properties of Composite Material by Tensile Tests. Part I: Elastic Properties*", publicado em 1998 no *Journal of Composite Materials*, vol. 32, Nº 4/1998, Gommers propõe um novo esquema na análise de dados de módulo de elasticidade em compósitos, obtidos por ensaio de tração. Este modelo é baseado nas regras de mudanças de eixos, quando se faz os ensaios em diferentes ângulos. Desta forma torna-se possível determinar a consistência dos dados obtidos, bem como encontrar o módulo de cisalhamento e a deformação vinculada a este último, através de simples ensaios de tração.

2.8.2 Método

O método desenvolvido por Gommers consiste basicamente na utilização de ensaios de tração em diversos ângulos, para compósitos reforçados por tecidos com diferentes configurações, dentre eles os tramados e os tricotados. A partir dos resultados dos ensaios em função dos ângulos e da simetria, podem ser decompostos num sistema de eixos classificados como estando alinhados (*on-axis*) e desalinhados (*off-axis*) ao esforço (Figura 2). Desta forma pode-se determinar os elementos da matriz *compliance* que determina todas as características do compósito em um estado de tensão.

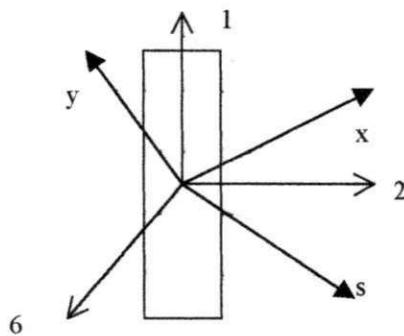


Figura 2 – Sistema de eixo de um compósito

Os ensaios de tração, são os mais utilizados para obtenção das constantes de engenharia (E_{xx} , E_{yy} , ν_{xy} e G_{xy}), as quais geram os elementos para a matriz *compliance*, quais sejam: $S_{xx}=1/E_{xx}$, $S_{yy}=1/E_{yy}$, $S_{xy}=-\nu_{xy}/E_{xx}$, e $S_{ss}=1/G_{xy}$. Estes ensaios são preferidos pela maioria dos pesquisadores por serem simples, baratos e os corpos de prova para os ensaios serem facilmente obtidos, bem como pela existência de uma metodologia padrão para os ensaios. Os subscritos x, y e s, referem-se as propriedades *off-axis* (é o sistema de eixos escolhido ao longo do eixo de simetria do compósito) (GOMMERS, 1998).

Para se definir uma matriz *compliance*, se faz necessário a exemplificação de alguns casos (POWELL, 1983).

1. Material Isotrópico.

Para uma material que tenha uma resposta isotrópica e linear a uma temperatura constante, a lei de Hooke nas coordenadas cartesianas (1, 2 e 3),

tem uma forma familiar:

$$\varepsilon_1 = \sigma_1/E - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)/E$$

$$\varepsilon_2 = \sigma_2/E - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)/E$$

$$\varepsilon_3 = \sigma_3/E - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)/E$$

$$\gamma_{23} = \tau_{23}/G$$

$$\gamma_{31} = \tau_{31}/G$$

$$\gamma_{12} = \tau_{12}/G$$

Uma matriz algébrica é um meio conveniente para se ter uma melhor manejo das relações entre tensão e deformação, então tem-se:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

Caso seja aplicada carga em um fino laminado, tem-se:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = [S] \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

onde [S] é a matriz *compliance*, e os seus elementos individuais tem por unidade m²/N.

2. Comportamento anisotrópico

Em um material anisotrópico, há uma ligação entre todas as tensões e todas as deformações. Para se ter uma melhor trabalhabilidade é necessário uma modificação na nomenclatura. Tensões diretas e as deformações possuem dois sufixos, isto é, σ_{11} , ε_{12} , γ_{12} , sendo assim os módulos deveriam apresentar também dois sufixos: E_{11} , E_{12} e G_{12} . Por convenção da engenharia utiliza-se a forma contrata, ou seja, σ_{11} se transforma em σ_1 , E_{11} em E_1 , entretanto G_{12} permanece o mesmo. Esta transformação tem por objetivo diminuir o número de sufixos da matriz *compliance* de 4 para 2 no máximo, facilitando desta forma o manejo das equações.

Sendo assim a união entre tensão e deformação (isto é a lei de Hooke generalizada) em um material anisotrópico pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}$$

onde [S] é uma matriz simétrica.

Para uma lâmina sob tensão, tem-se:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{16} & S_{26} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

Note-se, que S_{66} representa o cisalhamento, mas S_{12} envolve a união entre ε_1 e σ_2 ou ε_2 e σ_1 , e não cisalhamento.

3. Comportamento ortotrópico

Para uma lâmina ortotrópica sob tensões (*in-plane*), nas principais direções obtém-se:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

sem a união direta entre tensão e deformação de cisalhamento.

Mas qual o significado tem cada componente da matriz *compliance*? Ela pode ser bastante útil, os módulos E_1 , E_2 e ν_{12} os quais são medidos por testes uniaxiais, e para o módulo de cisalhamento (*in-plane*) G_{12} . Isto pode ser prontamente encontrado pela aplicação de uma única tensão na última equação.

Colocando $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$, nesta última equação, gerando $\varepsilon_1 = S_{11}\sigma_1$, então:

$$S_{11} = 1/E_1$$

De modo similar, com $\sigma_1 = \tau_{12} = 0$:

$$S_{22} = 1/E_2$$

e, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, gera:

$$S_{66} = 1/G_{12}$$

S_{12} é encontrado pela definição do coeficiente de Poisson, isto é:

$$\nu_{12} = -\varepsilon_2/\varepsilon_1$$

o qual é relatado quando se aplica uma tensão σ_1 com $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$. Mas, sob estas circunstâncias, $\varepsilon_1 = \sigma_1/E_1$, assim:

$$\nu_{12} = -\varepsilon_2/\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 E_1/\sigma_1$$

e, tem-se também, $\varepsilon_2 = S_{12}\sigma_1$:

$$S_{12} = -\nu_{12}/\sigma_1$$

Colocando-se $\sigma_1 = \tau_{12} = 0$, dá $S_{21} = \varepsilon_1/\sigma_2 = -\nu_{12}/E_2$ e como $[S]$ é uma matriz simétrica, $S_{ij} = S_{ji}$, então:

$$\nu_{12}/E_1 = \nu_{21}/E_2$$

Em resumo, então, a matriz *compliance* para uma lâmina ortotrópica pode ser expressa como:

$$[S] = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix}$$

Em suma a matriz *compliance* apresenta uma simetria, que está intimamente ligada ao tipo de reforço (tipo de tecido) empregado no compósito. Os diferentes tecidos apresentam diferentes arranjos com diferentes simetrias, podendo ser ortorrômbicos (como o tecido tramado e o tricotado, sendo que o primeiro é um ortotrópico) como mostra a Figura 2.

O número de constantes elásticas independentes é determinado pela simetria dos tecidos utilizados como elemento de reforço em compósitos. Uma lâmina unidirecional pode ser considerada transversalmente isotrópica, possuindo 5 constantes elásticas independentes. Se o sistema coordenado de eixos são escolhidos ao longo do eixo de simetria do material (*off-axis* sistema de coordenadas) com o plano isotrópico sendo o plano xy, a matriz compliance para este material apresenta a seguinte forma (GOMMERS, 1998):

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & 0 & 0 & 0 \\ \blacksquare & S_{yy} & S_{yz} & 0 & 0 & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & S_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & 2.(S_{yy} - S_{yz}) & 0 & 0 \\ \blacksquare & \text{simétrico} & \blacksquare & \blacksquare & S_{ss} & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & S_{ss} \end{bmatrix}$$

Para um sistema ortorrômbico, tem-se a existência de 9 constantes elásticas independentes, tendo-se a seguinte matriz *compliance*:

$$\begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & 0 & 0 & 0 \\ \blacksquare & S_{yy} & S_{yz} & 0 & 0 & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & S_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & * S_{ss} & 0 & 0 \\ \blacksquare & \text{simétrico} & \blacksquare & \blacksquare^{**} & S_{ss} & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare & S_{ss} \end{pmatrix}$$

*na realidade é $S_{s's'}$;

** na realidade é $S_{s's'}$.

Um sistema monoclinó possui 13 constantes elásticas independentes enquanto um sistema triclinó têm 21 constantes elásticas independentes. No

presente estudo foi utilizado apenas o sistema ortorrômbico.

2.8.3 O princípio da metodologia

Em um teste de tração ao longo do eixo 1 (Figura 2), o qual pode ser *on-axis*, dois componentes da matriz compliance podem ser medidos, S_{11} e S_{12} , como mostrado anteriormente:

$$S_{11} = \varepsilon_1/\sigma_1 \text{ e } S_{12} = \varepsilon_2/\sigma_1$$

com σ_1 sendo a tensão aplicada, ε_1 e ε_2 sendo as deformações longitudinal e transversal, respectivamente. Estas deformação são medidas por extensômetros (*strain gages*).

Se os ensaios são feitos a diferentes ângulos, os componentes da matriz *compliance* são medidos, e relatados em função dos eixos principais (*on-axis*), através das regras de transformação. Para o sistema triclinco (sem simetria), tem-se a seguinte transformação:

$$S_{11}^{(\theta)} = m^4 S_{xx} + n^4 S_{yy} + 2m^2 n^2 S_{xy} + m^2 n^2 S_{ss} + 2m^3 n S_{xs} + 2mn^3 S_{ys}$$

$$S_{12}^{(\theta)} = m^2 n^2 S_{xx} + m^2 n^2 S_{yy} + (m^4 + n^4) S_{xy} - m^2 n^2 S_{ss} + (mm^3 - m^3 n) S_{xs} + (m^3 n - mm^3) S_{ys}$$

onde $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$; S_{ij} com $i, j = x, y, s$ denotando as componentes da matriz *compliance* nos eixos principais (*on-axis*) e $S_{ij}^{(\theta)}$ componentes da matriz *compliance* a um ângulo θ . Para um material monoclinco ou de simetria superior, os últimos dois termos das últimas equações desaparecem, pois $S_{xs} = S_{ys} = 0$. Para um número p de ensaios em ângulo θ_k ($k = 1, \dots, p$), existem $2p$ de relações tal qual as mostradas nas últimas equações. Juntas, elas podem ser combinadas, gerando a seguinte regressão, a qual tem com variáveis S_{ij} ($i, j = x, y, s$):

$$\begin{bmatrix}
 (m_1)^4 & (n_1)^4 & 2 \cdot (m_1)^2 \cdot (n_1)^2 & (m_1)^2 (n_1)^2 & 2(m_1)^3 n_1 & 2m_1 (n_1)^3 \\
 (m_2)^4 & (n_2)^4 & (m_2)^2 \cdot (n_2)^2 & (m_2)^2 (n_2)^2 & 2 \cdot (m_2)^3 \cdot n_2 & 2m_2 (n_2)^3 \\
 (m_p)^4 & (n_p)^4 & (m_p)^2 \cdot (n_p)^2 & (m_p)^2 (n_p)^2 & 2 \cdot (m_p)^3 \cdot n_p & 2m_p (n_p)^3 \\
 (m_1)^2 (n_1)^2 & (m_1)^2 (n_1)^2 & -(m_1)^4 (n_1)^4 & -(m_1)^2 (n_1)^2 & m_1 (n_1)^3 - (m_1)^3 n_1 & (m_1)^3 n_1 - m_1 (n_1)^3 \\
 (m_2)^2 (n_2)^2 & (m_2)^2 (n_2)^2 & -(m_2)^4 (n_2)^4 & -(m_2)^2 (n_2)^2 & m_2 \cdot (n_2)^3 - (m_2)^3 \cdot n_2 & (m_2)^3 \cdot n_2 - m_2 \cdot (n_2)^3 \\
 (m_p)^2 (n_p)^2 & (m_p)^2 (n_p)^2 & -(m_p)^4 + (n_p)^4 & -(m_p)^2 (n_p)^2 & m_p \cdot (n_p)^3 - (m_p)^3 \cdot n_p & (m_p)^3 \cdot n_p - m_p \cdot (n_p)^3
 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{xy} \\ S_{ss} \\ S_{xs} \\ S_{ys} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{11})^{\theta_1} \\ (S_{11})^{\theta_2} \\ (S_{11})^{\theta_p} \\ (S_{12})^{\theta_1} \\ (S_{12})^{\theta_2} \\ (S_{12})^{\theta_p} \end{bmatrix}$$

Equação 1 – Matriz *compliance* desenvolvida por Gommers (Equação do tipo $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$)

com $m_k = \cos(\theta_k)$, $n_k = \sin(\theta_k)$ e $S_{ij}^{(\theta_k)}$ denota os componentes da matriz *compliance* nos ângulos θ_k . A matriz 2p por 6, apresenta em seu lado esquerdo somente senos e cossenos dos ensaios de tração nos ângulos θ_k , e, no lado direito estão as medidas dos componentes da matriz *compliance* para estes ângulos. Em geral um problema de regressão $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ pode ser resolvido se a matriz \mathbf{A} tiver um grau cheio. Pela Equação 1 a matriz deve ter um grau 6, ou deve haver pelo menos seis medidas independentes. Por exemplo, três ensaios de tração a 0° , 60° e 120° geram 6 medidas independentes. Para um material monoclinico ou com uma simetria maior, as duas últimas colunas da matriz, da Equação 1, desaparecem pois $S_{xs} = S_{ys} = 0$. Para esses materiais, 4 medidas independentes são suficientes, sendo necessário apenas dois ensaio de tração a 0° e 45° , por exemplo. Entretanto, se os ensaios forem realizados a

0° e 90°, gera apenas 3 medidas independente, pois $S_{12}^{(0^\circ)} = S_{12}^{(90^\circ)}$.

Para um ensaio de tração realizado a 45°, tem-se:

$$S_{11}^{(45^\circ)} = (1/4)(S_{xx} + S_{yy} + 2S_{xy} + S_{ss} + 2S_{xs} + 2S_{ys})$$

$$S_{11}^{(45^\circ)} = (1/4)(S_{xx} + S_{yy} + 2S_{xy} - S_{ss})$$

Para um material monoclinico ou com uma simetria maior, $S_{xs} = S_{ys} = 0$, sendo assim o módulo de cisalhamento pode ser encontrado por:

$$S_{ss} = 2(S_{11}^{(45^\circ)} - S_{12}^{(45^\circ)})$$

Se somente for medida a deformação longitudinal, nenhum valor de S_{xy} e S_{ss} pode ser calculado somente com o valor de $S_{11}^{(\theta_k)}$, isto pode ser mostrado pela Equação 1, após se omitir a metade inferior do lado esquerdo da matriz **A**. Então os coeficientes de S_{xy} e S_{ss} são iguais, exceto por um fator 2. Isto implica que eles não podem ser determinados separadamente. Por outro lado, S_{xx} , S_{xy} , S_{xs} e S_{ys} podem ser determinados somente com $S_{11}^{(\theta_k)}$, como também S_{11} , S_{22} , S_{16} e S_{26} nas orientações fora dos eixos.

GOMMERS (1998), em seu artigo, também desenvolve uma otimização do seu método. Onde através de séries matemáticas e de simulações computacionais, ele chega aos ângulos mais significativos, isto é, àqueles nos quais se encontram os melhores valores. Para um sistema monoclinico ou com simetria superior os ângulos são 0 e 50° ou 0, 45, 45 e 90°, para um material triclinico os ângulos são 0, 60 e 120° ou 0, 36, 72, 108 e 144°. Esta otimização não foi utilizada neste estudo. Pelo fato do equipamento de ensaio estar com defeito não foi possível realizar os ensaios para o ângulo de 50°, o qual seria o mais indicado para a simetria utilizada neste trabalho.

CAPÍTULO III

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

Devido à variedade de formas em que as fibras de juta são utilizadas como reforço em plásticos muitos estudos estão sendo desenvolvidos com o intuito de melhorar sua processabilidade e seu uso. Estes estudos vão desde a caracterização térmica da fibra até a mistura da fibra de juta com fibra de vidro.

Para se ter pleno domínio sobre as propriedades da juta muitos estudos de identificação de seus componentes tem sido realizados, dentre eles destacam-se:

BHARDURI et al. (1994) caracterizaram a fibra de juta termicamente por DSC, DTG e TG, e identificaram os principais compostos químicos constituintes: homocelulose, α -celulose, hemicelulose e lignina. A caracterização térmica mostrou uma degradação a temperaturas mais baixas para a homocelulose, α -celulose e hemicelulose enquanto que a lignina é a fração mais resistente à degradação térmica; a ordem decrescente de facilidade de degradação é: homocelulose > α -celulose > hemicelulose > lignina. Concluíram que a presença de maior quantidade de lignina nas fibras naturais torna-as mais resistentes à degradação térmica.

Entretanto devido à difícil compatibilidade entre a matriz e as fibras naturais, dentre elas a juta, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de melhorar a interação entre a fibra e a matriz, e conseqüentemente melhorar as propriedades mecânicas.

CHAWLA et al. (1978), fizeram um estudo comparativo das propriedades mecânicas entre os compósitos poliéster-sisal e os compósitos empregando

fibra de vidro, carbono e kevlar-29 como reforço. Os autores concluíram que o módulo de elasticidade e a tensão na ruptura aumentam com o acréscimo da fração volumétrica das fibras. O sisal mostrou-se promissor como reforço de resinas em função do baixo preço e propriedades específicas, mas devido a uma interface fraca as propriedades mecânicas apresentam limitações.

PRASAD et al. (1983), estudaram o efeito de um tratamento alcalino nas fibras em compósitos poliéster/fibra de côco. O tratamento superficial foi realizado à temperatura ambiente por imersão das fibras em uma solução de NaOH à 5% por períodos de 24, 48, 72 e 96 horas. Os tratamentos resultaram em modificação na superfície da fibra, aumentando a molhabilidade, facilitando o processamento e prevenindo a flotação e segregação das fibras. Os tratamentos de 72 e 96 horas resultaram em 10 e 15% de aumento na resistência tênsil, 40% de aumento no módulo elástico e 90% de aumento na ligação da matriz.

SHIRINDAR et al. (1984) estudaram as propriedades tênsis, flexão e impacto de compósitos poliéster juta uni e bidirecionais, compósitos híbridos poliéster/juta/fibra de vidro e o tratamento superficial das fibras através do recobrimento com lignina. Concluíram que o tratamento superficial com lignina diminui o consumo de resina e não afeta as propriedades tênsis e de flexão. O módulo de Young não foi suficientemente alto para tais aplicações estruturais.

SEMSARZADEH et al. (1985) estudaram o efeito interfacial no compósito poliéster insaturado reforçado com fibra de juta. O pré-tratamento da fibra com tetrahidrofurano, poliacetato de vinila e ácido acrílico nas propriedades de impacto, tração e absorção de água, bem como as reações químicas ocorridas no sistema, foram estudadas. Os autores concluíram que o tratamento com tetrahidrofurano levou a um decréscimo nas propriedades de impacto e absorção de água. As propriedades dos compósitos pré-tratados com poliacetato de vinila tiveram uma melhora limitada, enquanto que os tratados com ácido acrílico apresentaram altas propriedades mecânicas e baixa absorção de água.

ARRUDA (1994), estudou as propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta na forma de tecidos e fios contínuos, e do efeito de tratamentos

superficiais nas fibras de hipoclorito de sódio e agente de acoplamento silano. Concluiu que leves aumentos nas propriedades mecânicas dos compósitos foram obtidos para as fibras tratadas por 3 horas com hipoclorito de sódio enquanto que tratamentos mais longos (20 horas), causaram empobrecimento destas propriedades. O módulo de elasticidade e a resistência mecânica, aumentaram com o acréscimo da fração volumétrica das fibras brutas.

BATISTA (1995) investigou o efeito de diferentes tipos de tratamentos superficiais e pré-tratamentos da fibra de juta nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster/tecido de juta. Concluiu que as fibras tratadas com 10% de pré-polímeros isocianato e uretano derivados do óleo de mamona promoveram um aumento nas propriedades mecânicas de tais compósitos quando comparado com as fibras sem tratamentos.

VARMA (1993^a, 1984^b) et al. & JOSEPH et al. (1993^a, 1995^b, 1996^c), estudaram o efeito de tratamento superficiais em vários tipos de fibras, especialmente a juta. Estes autores relataram que as fibras de juta modificadas com agentes de acoplamento silano (δ -amino propil trimetoxi silano), titanato(isopropil triestearoil titanato) e diisocianato exibem menor recuperação de umidade e, portanto, são mais adequadas ao uso como reforço em matrizes orgânicas. As propriedades mecânicas de tais compósitos variam com o teor de fibra e com o tipo de tratamento superficial.

COSTA (1997) estudou os efeitos de modificações químicas na juta no compósito poliéster/juta, relatando que o tratamento do reforço com isocianato promoveu um melhor desempenho nas propriedades mecânicas de tal compósito.

CARVALHO et al. (1998) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos unidirecionais de poliéster insaturado/cordões de juta em função do teor de reforço e de uma modificação superficial básica da fibra por imersão e por refluxo em solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH). Os resultados indicam que a resistência mecânica dos compósitos aumentou com o teor de fibras, que o tratamento das fibras por refluxo em solução aquosa de NaOH levou a um leve aumento na resistência e a uma diminuição da rigidez dos compósitos. A resistência ao impacto dos compósitos aumentou com o teor de fibras, diminuiu com a modificação básica da fibra e permaneceu inalterada

pelo envelhecimento térmico a úmido de tais compósitos.

MITRA et al. (1998) elaboraram um estudo sobre os compósitos reforçados por juta, suas limitações e algumas soluções através de modificação química das fibras. Os autores concluíram que devido a fibra de juta ser hidrofílica (altamente higroscópica) e as resinas serem geralmente hidrofóbicas, o molhamento das fibras pela matriz é pobre resultando numa baixa adesão. Para melhorar as propriedades interfaciais é necessário uma secagem das fibras e/ou adição de agentes de acoplamento para a redução da absorção de umidade aumentando, portanto, a interação fibra/resina.

RICCIERI et al. (1999) estudaram as propriedades interfaciais de compósitos unidirecionais de resina poliéster insaturada reforçados com fibras de juta e sisal. Concluíram que a modificação de matriz com pré-polímeros de isocianato de uretano aumenta a adesão de interfacial entre a fibra e a matriz. A modificação por isocianato foi mais eficiente que por uretano promovendo uma melhor adesão e valores de tensão cisalhamento mais altos. Para o compósito de fibra de juta, há um bom acordo entre o módulo experimental e o teórico obtido pela regra das misturas.

Outros pesquisadores desenvolveram estudos sobre as propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras de juta, brutas, isto é, que não foram tratadas superficialmente.

PAL (1984), estudou as possibilidades de se empregar a juta como reforço na produção de compósitos de baixo custo, empregando as resinas poliéster, epoxi e fenólica como matrizes. Concluiu que as fibras de juta podem substituir as fibras de vidro em aplicações onde as propriedades mecânicas e a resistência às intempéries não são muito exigidas, sendo necessários estudos no sentido de melhorar a adesão fibra-matriz.

ROE et al. (1985) estudaram as propriedades tênses da resina poliéster reforçada com juta e concluíram que estas apresentam propriedades específicas até superiores que as do poliéster reforçado com fibra de vidro. Apresentando em muitos aspectos, possui desempenho superior à fibra de vidro.

SOUSA (1998), em seus trabalhos com poliéster reforçado com juta concluiu que as propriedades de tais compósitos aumentam com o teor em

peso e volume de fibras, indicando que esta age como reforço para tal polímero.

GOWDA et al. (1999) estudaram o comportamento de um compósito de matriz poliéster, reforçado com um tecido de fibras de juta e concluíram que, apesar deste compósito não possuir resistência à tração e módulo de elasticidade tão elevados quanto os compósitos reforçados por fibras sintéticas, estes apresentam resistência superior aos compósitos reforçados por madeira e alguns plásticos.

CAVALCATI (2000), estudou as propriedades de compósitos de matriz poliéster, moldados por compressão e reforçados por tecido de juta tramado. Seus resultados mostram que, apesar da resistência aumentar com o teor de fibra, inicialmente, a resistência à tração dos compósitos era inferior a da matriz. Porém com teores de fibra superior a 50% em peso de fibra a resistência do compósito é 20% superior a da matriz.

O comportamento destes compósitos, quando submetidos à degradação térmica, foi avaliado por alguns autores.

MEDEIROS & CARVALHO (1999) estudaram as propriedades mecânicas em tração de compósitos poliéster/juta (30% em peso), produzidos por pultrusão, em função do tempo de envelhecimento (0, 5, 10, 15 e 20 dias de exposição em estufa a 110°C). Os resultados mostraram que as condições de envelhecimento térmico empregada não foram suficientes para promover uma degradação acentuada do compósito. A redução na resistência à tração do compósito com o tempo de envelhecimento foi atribuída à alta higroscopicidade da fibra de juta que leva a um enfraquecimento da interface.

CAVALCANTI (2000), estudou as propriedades mecânicas em tração de compósitos poliéster/tecido (tramado) de juta em teores de 33 e 54% em peso de fibra, envelhecidos no intervalo de 10 a 50 dias, em estufa com circulação de ar a uma temperatura de 110°C. Verificou-se que a resistência à tração da matriz e dos compósitos sofrem um decréscimo considerável nos 10 primeiros dias de exposição térmica, permanecendo praticamente inalterados para tempos de exposição mais longos.

Outra forma que os pesquisadores encontraram para melhorar o desempenho de compósitos a base de fibras naturais, principalmente os de

juta, foi a união de tipos diferentes de fibras, como por exemplo, juta e algodão ou juta e fibra de vidro.

SHAH & LAKKAD (1981), pesquisaram as propriedades mecânicas de compósitos à base de poliéster e epoxi reforçados unidirecionalmente com fibras de juta e vidro, e compósitos híbridos de juta/fibra de vidro. Os resultados mostraram que as fibras de juta podem ser usadas como reforço em aplicações onde a resistência e módulo requeridos dos compósitos não sejam muito elevados. A fibra de juta consome muita resina, e este problema foi parcialmente resolvido com a produção de compósitos híbridos.

CLARK & ANSELL (1986), produziram por *hand lay-up*, laminados híbridos com juta e fibra de vidro empregando o poliéster como matriz. Fizeram laminados em diversas formas de construção e avaliaram suas propriedades mecânicas, resistência às intempéries e custo final do produto. Concluíram que os laminados híbridos possuem boa resistência ao impacto e a resistência à fratura máxima é conseguida com a juta entre duas camadas de fibra de vidro.

JOSEPH & CARVALHO (1999), estudaram o comportamento mecânico de compósitos de matriz poliéster reforçados com um tecido híbrido, tramado, de juta e algodão. Ficou evidenciado que as propriedades dos compósitos testados na direção das fibras de juta aumentam com o teor de fibra até um valor máximo de 50% (em peso), após este valor há um decréscimo. Resistências à tração 220% superiores à matriz, foram obtidas. Na direção do algodão esta propriedade foi 50% inferior à da matriz. Segundo os autores, estes compósitos podem ser utilizados em aplicações estruturais e, a utilização de tecidos híbridos é mais prática e conveniente do que a de mantas de fibras curtas ou unidirecionais.

CARVALHO et al. (1999), estudaram as propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados por tecidos híbridos (tramados) juta/vidro, juta/algodão e sisal/algodão, com os seguintes teores: a) juta/vidro: 44% de juta e 56% de vidro; b) juta/algodão: 72% de juta e 28% de algodão; e c) sisal/algodão: 72% de sisal e 28% de algodão. Os resultados mostraram que os compósitos estudados possuem uma resistência até 5 vezes maior que a da matriz; são 2 a 3 vezes mais rígidos e são capazes de alongarem 2 a 5 vezes mais que a matriz, podendo ser utilizados em compósitos estruturais.

NÓBREGA (2000), estudou o comportamento mecânico de compósitos de matriz poliéster, reforçados por um tecido híbrido juta/fibra de vidro em função do teor de fibra e orientação do tecido. O tecido híbrido era composto por 44% de juta no urdume e 56% de fibra de vidro na trama. Os resultados mostraram que houve um aumento nas propriedades mecânicas com o aumento do teor de reforço. Os compósitos reforçados por tecido híbridos, quando testados na direção da fibra vidro apresenta propriedades mais elevadas do que quando testados na direção das fibras de juta, o que é atribuído às propriedades dos componentes individuais do tecido e ao fato das fibras de juta estarem dispostas no urdume. Os compósitos reforçados por tecidos híbridos com seqüência 0/90°, apresentaram propriedades intermediárias às obtidas quando comparadas às de compósitos equivalentes testados no sentido longitudinal às fibras de vidro ou às fibras de juta.

Quando aos estudos realizados com tecidos tricotados, relativamente poucos trabalhos têm sido desenvolvido. Na sua maioria os estudos são realizados com tricotados a base de fibra de vidro.

RUDD et al. (1990), pesquisaram as propriedades mecânicas do laminado poliéster/tecido tricotado tramado (*weff*) de fibra de vidro. Os resultados experimentais indicaram que o reforço tricotado produziu propriedades anisotrópicas no laminado, com as propriedades sendo menores na trama (ou *course*).

WU et al. (1993), estudaram o comportamento de três tipos diferentes de tecidos tricotados urdidos (*warp*). Os resultados mostraram que os melhores resultados são obtidos na direção do *wale*. Fato contrário acontece nos tecidos tricotados tramados (*weff*) que a direção de melhores propriedades é o curso (*course*).

RAMAKRISHNA (1994), conduziu uma série de ensaios para validação de um procedimento analítico. Para tanto foi utilizado um tecido tricotado tramado (*weff*) de fibra de vidro e tendo a resina epoxi como matriz. Os resultados mostraram que melhores propriedades são obtidas na direção da trama (*weff*) quando comparada com o urdume (*warp*). E que com o aumento do teor de fibra há um aumento nas propriedades na direção da trama quanto do urdume.

CAPÍTULO IV

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

□ Fibra de juta

Foram utilizados dois tipos diferentes de tecidos feitos a base da fibra de juta. Para o tecido tricotado, manualmente, foi utilizado um fio de juta de referencia 10/2, isto é um fio formado por duas "pernas" de juta retorcida. Para o tecido tramado, foi utilizado um tecido com classificação 2J, utilizado em sacaria, pela urdidura e trama de fios de 1,5mm de diâmetro em média, malha relativamente estreita e peso teórico de 340 g/m². Tanto o fio quanto o tecido foram fornecidos pela Companhia Têxtil Castanhal, PA.

O tecido tramado empregado é do tipo simples (*plain weave*), isto é, com os fios do urdume passando por cima e por baixo de cada fio da trama. O tecido tricotado utilizado foi confeccionado manualmente (com agulha nº 3) em "ponto meia", isto é, com a agulha guiando o fio e sempre passando por baixo da laçada. A arquitetura dos tecidos utilizados está ilustrada nas Figuras 3a e 3b abaixo.

A forma dos tecidos utilizados está mostrada na Figura 3.

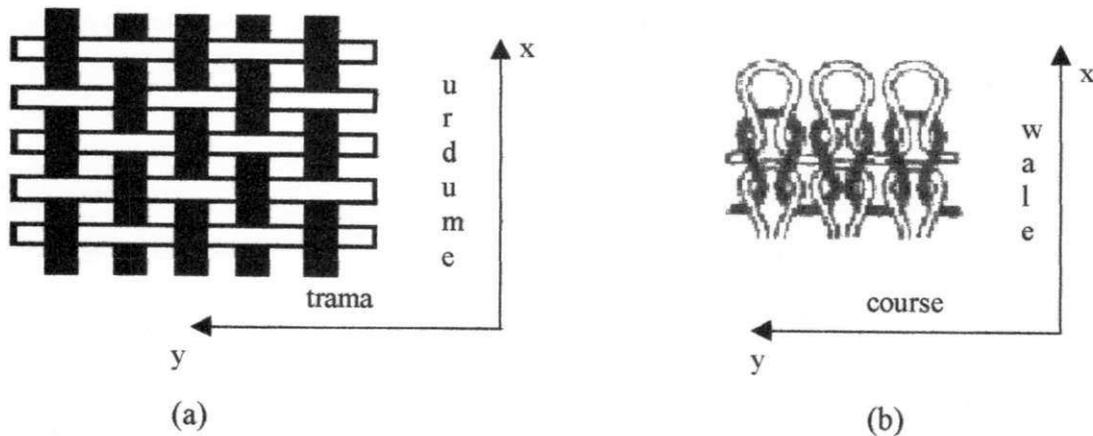


Figura 3 – Tecidos de juta: a) Tecido Tramado – *Plain weave* – Ortorrômbico;
 b) Tecido Tricotado – *Plain weft knit* - Ortorrômbico

O tecido tricotado apresenta a seguinte densidade de pontos, em uma área de 10 x 10 cm, $20,40 \pm 1,67$ pontos na direção *wale* e $14,20 \pm 1,10$ na direção *course*. E apresenta o seguinte peso específico médio de 821g/m^2 .

□ Resina poliéster

Foi utilizada uma resina poliéster de uso geral de referência RESAPOL 10-116, dissolvida em estireno, fornecida pela Resana S/A. Esta resina segundo o fabricante é do tipo insaturada, ortoftálica, rígida, totalmente polimerizável, apresentando baixa reatividade, baixa viscosidade, sendo tixotrópica e pré-acelerado. É indicado para aplicações em piscinas, banheiras, peças automotivas, náuticas e acessórios reforçados com fibras de vidro, moldados em processo aberto (laminação manual ou a pistola). Apresenta um rápido ciclo de cura à temperatura ambiente e uma excepcional característica de penetração nas fibras de vidro.

□ Iniciante

Como catalisador foi utilizado o peróxido de metil cetona em concentração de 1%, em volume.

3.2 Métodos

□ Confeção do compósito

Os compósitos foram confeccionados por compressão à temperatura ambiente, sob força de 8 toneladas aplicada por um período de 8 horas, entretanto, antes da compressão tinha-se um tempo de gelificação em torno de 20 minutos. Foram utilizados moldes de aço retangulares com dimensões de 150 x 180 mm e espessuras de 3 mm, para os tecidos tricotados e 2mm, para os tramados. Esta diferença em espessura dos moldes foi necessária para que compósitos com teores de fibra aproximados, tanto com o tecido tricotado quanto com o tecido tramado, pudessem ser obtidos pois a natureza da sua arquitetura, determina que os tecidos tramados sejam mais finos do que os tricotados. Diferentes teores de fibras foram obtidos variando-se o número de camadas de reforço. No caso do tecido tricotado utilizou-se 1 a 3 camadas (com teores em peso variando de 20,0 a 49,0%) de reforço enquanto que, para o tecido tramado foram utilizadas e 2 e 4 camadas (com os teores variando de 24,0 a 40%, em peso). Em todos os casos, as camadas foram orientadas na direção da trama (tecidos tramados) ou das carreiras - *course* (tecidos tricotados).

□ Confeção dos corpos de prova

Corpos de prova, com dimensões de 110x12,7mm (com comprimento útil de 60mm) e espessura de 2 ou 3mm foram manualmente cortados a partir das placas obtidas e o acabamento dado com lixas. Para os compósitos reforçados por tecidos tramados os corpos de prova foram recortados na direção do urdume (0°), da trama (90°) e na diagonal (45°), enquanto que para os reforçados por tecidos tricotados os cortes foram na direção dos cordões (*wale*, 0°) e das carreiras (*course*, 90°). No caso dos compósitos reforçados por uma camada de tecido tricotado foram retirados corpos de prova, ainda nos ângulos de 30 e 60°, em relação ao eixo x – direção dos cordões ou *wale* (de acordo com a Figura 2). Os ensaios mecânicos foram realizados segundo as normas ASTM D-3039 e D-256, para os ensaios de tração e impacto, respectivamente.

□ Pós-cura

Os corpos de prova dos compósitos com tecido tricotado, já com as medidas normalizadas, passaram por um processo de pós-cura, em estufa com circulação de ar, operando a 90°C por duas horas. Posteriormente, estes foram ensaiados mecanicamente.

□ Ensaio mecânicos

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina TESTOMETRIC MICRO 350, operando a uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/mim para os ensaios de tração. Os ensaios de impacto IZOD, com corpos de prova não entalhados, foram conduzidos de acordo com a norma ASTM D 256 em máquina de impacto TMI, operando com um martelo de 2J.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

3.3.1 Métodos

A metodologia desenvolvida por Gommers, foi baseada num sistema epoxi/fibra de vidro, com diferentes simetrias. No presente estudo, aplica-se esta metodologia a compósitos feitos a base de matriz poliéster reforçados por um tecido tricotado (ortorrômico) de juta. Gommers, em seu estudo utilizou extensômetros para medida das deformações longitudinal e transversal. Devido a problemas de comunicação entre o microprocessador do equipamento universal de ensaio (Testometric 350) com o microcomputador, não foi possível utilizar o extensômetro para se encontrar os valores dos módulos elásticos. Desta forma, o módulo elástico foi calculado manualmente. Estipulou-se uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/mim, e a cada 0,1mm de deformação era feita a medida da carga aplicada ao corpo de prova. Com estes dados, plotou-se gráficos de tensão x deformação. Na faixa entre 0,5 e 1,5% de deformação, aqueles pontos que estavam mais retilíneos, eram escolhidos, e o módulo elástico era calculado como a inclinação da reta que passava por este pontos.

Como não foi possível utilizar o extensômetro foi necessário se estipular um valor para o coeficiente de Poisson. Na literatura (GOWDA, NAIDU & CHHAYA, 1999), encontra-se que os valores do coeficiente de Poisson para compósitos poliéster/tecido tramado de juta está entre 0,22-0,25 e para a resina poliéster está entre 0,37-0,39 (HULL & CLYNE, 1996). Portanto, estipulou-se que o coeficiente de Poisson para os compósitos poliéster/tecido tricotado de juta deve estar entre 0,2-0,4, baseado nos valores dos coeficiente de Poisson citados anteriormente. Levando-se em consideração que os valores do módulo elástico são valores mensuráveis e reais e que o método de modelagem matemática desenvolvida por Gommers gera valores exatos das medidas realizadas, fez-se o caminho inverso, isto é, assumiu-se valores para o coeficiente de Poisson e com o módulo e deformações longitudinais (ϵ_1) experimentalmente determinadas para compósitos ensaiados a 0 e 45°, em relação ao esforço, aplicou-se a definição do coeficiente de Poisson ($\nu = \epsilon_1/\epsilon_2$) para determinar a deformação transversal (ϵ_2). Com estes valores obteve-se S_{11} e S_{12} , e desta forma, calculou-se os valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} (exemplo em anexo).

Ao mesmo tempo foram realizados ensaios a 30, 60 e 90°, obtendo-se os dados experimentais de $S_{11}^{(30^\circ)}$, $S_{11}^{(60^\circ)}$ e $S_{11}^{(90^\circ)}$. Posteriormente foram utilizados os valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} , para calcular os valores teóricos de $S_{11}^{(30^\circ)}$, $S_{11}^{(60^\circ)}$ e $S_{11}^{(90^\circ)}$, sendo considerado o coeficiente de Poisson verdadeiro aquele no qual os valores teóricos mais se aproximaram dos valores práticos.

Desta forma com o coeficiente de Poisson "verdadeiro", calculou-se os valores dos diversos módulos: elástico e cisalhamento.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito anteriormente neste trabalho avaliou-se as propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta. Foram utilizados como reforço dois tipos diferentes de tecidos (um tricotado e um tramado) variando-se o número de camadas, e por conseqüência o teor de fibra. Determinou-se o comportamento mecânico (resistência à tração e ao impacto, alongamento, e módulo de elasticidade) de todos os compósitos. O efeito do tratamento de pós-cura na resistência à tração, no módulo elástico e alongamento para os compósitos reforçados com tecido tricotado, também foi avaliado. Inicialmente, serão mostrados os resultados para os compósitos reforçados por tecidos tricotados e tramados, e posteriormente será feita uma comparação entre os dois, avaliando os efeitos das diferentes arquiteturas dos tecidos nas propriedades finais dos compósitos.

5.1 Tecidos Tricotados

Nas Tabelas 2, 3 e 4 estão listados os valores para tensão na ruptura, módulo elástico e alongamento, respectivamente para compósitos reforçados pro 1, 2 e 3 camadas de tecido tricotado.

Tabela 2 – Efeito do teor de fibra (em peso) e do ângulo de ensaio nas propriedades de compósitos poliéster/tecido tricotado de juta, com apenas uma camada de tecido

Teor de fibra, em peso (%)	Tensão na Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Alongamento (%)
0°			
18,64 ± 0,49	17,92 ± 0,18	1,16 ± 0,28	2,32 ± 0,66
23,45 ± 0,64	16,85 ± 0,04	1,29 ± 0,11	2,02 ± 0,32
33,50	19,94 ± 1,38	1,60 ± 0,14	2,14 ± 0,33
30°			
16,17	15,38 ± 2,56	0,83 ± 0,14	2,40 ± 0,73
45°			
25,01 ± 0,73	15,46 ± 1,34	0,88 ± 0,08	2,22 ± 0,01
60°			
20,86	15,97 ± 2,82	1,15 ± 0,09	1,86 ± 0,25
30,83	17,07 ± 0,58	0,99 ± 0,14	2,62 ± 0,32
90°			
23,94 ± 0,50	17,76 ± 0,71	1,08 ± 0,11	2,46 ± 0,90

Tabela 3 - Efeito do teor de fibra (em peso) e do ângulo de ensaio nas propriedades de compósitos poliéster/tecido tricotado de juta, com duas camadas de tecido

Teor de fibra, em peso (%)	Tensão na Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Alongamento (%)
0°			
40,4	19,18 ± 0,54	0,99 ± 0,09	3,32 ± 0,16
90°			
41,5	20,91 ± 0,59	1,18 ± 0,20	3,17 ± 0,44

Tabela 4 - Efeito do teor de fibra (em peso) e do ângulo de ensaio nas propriedades de compósitos poliéster/tecido tricotado de juta, com três camadas de tecido

Teor de fibra, em peso (%)	Tensão na Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Alongamento (%)
0°			
46,93 ± 1,70	15,85 ± 4,16	0,69 ± 0,17	4,25 ± 1,77

Dos dados das Tabelas 2, 3 e 4, os valores que não possuem desvio padrão são aqueles que apenas uma placa foi utilizada para os corpos de prova ensaiados. Na Tabela 2, a 0°, o valor do teor de fibra de 33,50% foi obtido utilizando-se o molde de 2mm de espessura, ao invés do de 3mm. As tabelas evidenciam que houve uma grande variação nos teores de fibra, principalmente, para os compósitos reforçados por uma camada de tecido tricotado. Isto pode ser atribuído ao fato dos tecidos tricotados serem produzidos manualmente, tendo, portanto, variações de tensão que afetam o tamanho e abertura dos pontos. Outro fator que afetou o teor de fibra é o tempo de gelificação e a temperatura ambiente. O molde não é hermético e, durante a compressão há vazamento de resina. A viscosidade da resina é função do seu estado de cura e depende fortemente da temperatura ambiente. Em todos os casos aguardou-se 20 minutos antes de se aplicar a pressão de compressão. Em dias de temperatura mais amena a gelificação seria menor ou seja, menor viscosidade, facilitando a fuga da resina o que por sua vez provoca um aumento no teor de fibra do compósito. Estes efeitos são minimizados em compósitos com duas e três camadas de tecido pois o teor de resina e portanto a possibilidade de vazamento é menor.

Verifica-se na Tabela 2 e na Figura 3 que, para compósitos reforçados por uma única camada de tecido, praticamente não há variação dos valores de tensão na ruptura, módulo elástico e alongamento, com o ângulo de teste, exceção feita para um teor de fibra mais elevado (33,50%).

Na Figura 3 estão reportados os valores de tensão na ruptura para a resina poliéster e os compósitos com uma camada de tecido tricotado, com um teor médio de fibra de 22,70% ± 4,76% (excluindo-se os valores de 33,5% a

0°). Comparando-se os valores obtidos para os compósitos com o da a matriz pura, se verifica que a resistência dos compósitos é 50% inferior à da matriz. Este comportamento pode ser atribuído:

1. ao teor crítico de fibra não ter sido atingido de forma que a resistência do compósito é dominada pela matriz e as fibras estejam agindo como inclusões ou defeitos, reduzindo a resistência do compósito;
2. ao não alinhamento das fibras na direção de sollicitação o que impede que estas elevem a resistência do compósito.

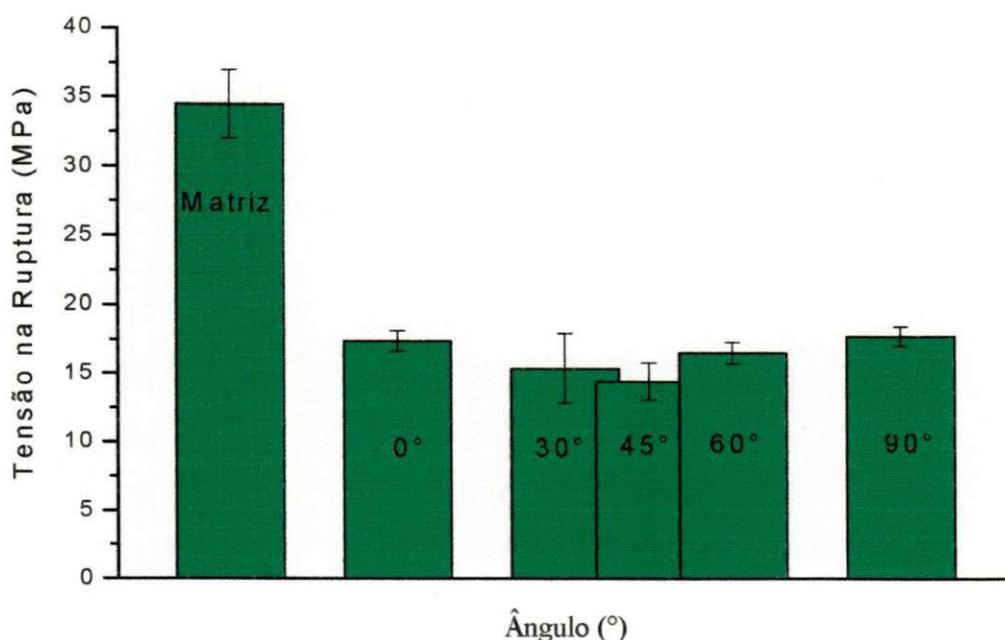


Figura 3 – Comportamento da tensão na ruptura em função dos ângulos de ensaio, para compósitos com apenas uma camada de tecido tricotado e teor médio de fibra de $22,70\% \pm 4,76\%$

Ao se comparar os ângulos 0° (cordões - *wale*) e 90° (carreira - *course*), verifica-se que praticamente não há variação da tensão na ruptura, apresentando uma pequena superioridade no valor médio a 90°, nesta situação têm-se uma menor deformabilidade do tecido tricotado, o que pode explicar este pequeno aumento em relação a outra direção (0° - cordões - *wale*). Entretanto dos ângulos estudados estes foram os que apresentaram os

maiores valores, devido ao maior ordenamento do tecido. Para os outros ângulos em estudo os valores foram mais baixos devido à falta de uma estrutura ordenada do tecido nestes ângulos.

Em suma, para os compósitos com uma camada de tecido tricotado, tem-se uma certa isotropia no que se refere à tensão na ruptura, pois independente dos ângulos os valores desta propriedade foram muito próximos uns dos outros. Demonstrando que esta propriedade está sendo dominada pela matriz, e que o tecido neste caso, funciona como uma imperfeição.

A Tabela 2, mostra que o comportamento do módulo elástico, ao contrario da tensão na ruptura, varia bastante em função dos diversos ângulos de ensaio. Os valores mais altos foram obtidos a 0° e os mais baixos em 30 e 45°. Verifica-se ainda, que para o maior teor de fibra (33,5%, 0°, molde de 2mm), tem-se o maior valor de módulo. Este resultado era esperado pois o módulo da fibra é superior ao da matriz.

A Figura 4, ilustra o comportamento do módulo elástico dos compósitos reforçados por um teor de $22,70 \pm 4,76\%$ de fibra em função dos ângulos de ensaio e os compara ao valor do módulo elástico da matriz.

Esperava-se que o maior valor de módulo elástico fosse obtido a 90° (carreira – *course*), pois nesta direção se tem a menor deformabilidade do tecido, o que tenderia a aumentar o módulo elástico. Entretanto, o maior valor foi obtido para a 0° (cordões – *wale*). Porém, verifica-se (Figura 4) que a 90° tem-se um dos maiores desvios, tendo portanto valores máximos equivalentes a 0°. Para os demais ângulos, há uma variação relativamente grande, no valor médio do módulo elástico, sendo menor a 30° e maior a 60°. Este comportamento pode ser atribuído ao fato da dispersão natural do tecido tricotado manualmente. Um outro motivo para este comportamento foi que para os ângulos intermediários, principalmente 30 e 60°, foram utilizados menos corpos de prova, em relação a 0°. O mesmo aconteceu para os ângulos de 90 e 45°, entretanto o número de corpos de prova utilizados foi superior aos de 30 e 60.

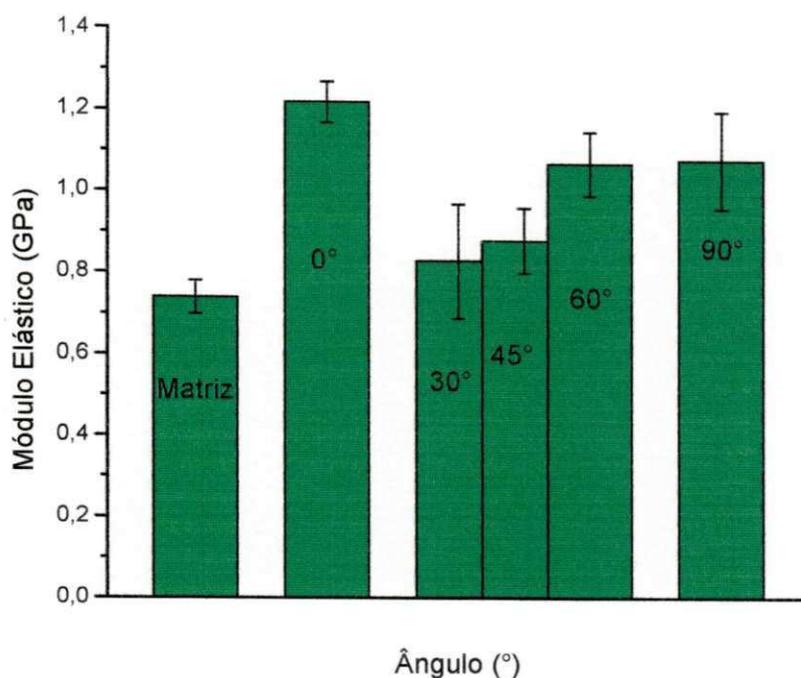


Figura 4 – Comportamento do Módulo Elástico em função dos ângulos de ensaio, para compósitos com apenas uma camada de tecido tricotado e teor médio de fibra de 22,70% ± 4,76%

A Tabela 2, indica que o comportamento do alongamento na ruptura dos compósitos para todos os ângulos de ensaio em estudo, não sofreu muitas alterações. Entretanto quando se compara a matriz (Figura 5), verifica-se que o alongamento dos compósito foi cerca de 3 vezes menor do que o da matriz.

Verifica-se, ainda pela Figura 5, que a maior deformação dos compósitos ocorre a 90° (carreiras - *course*) direção na qual se esperaria o menor alongamento (devido a menor deformabilidade do tecido), entretanto, foi nesta direção que se observou também a maior dispersão nos resultados. Porém ao se analisar os valores médios para todos os ângulos em estudo, estes se mantiveram praticamente inalterados, variando muito pouco em torno da faixa de 2% de alongamento. Ao se comparar com a matriz tem-se uma queda nesta propriedade, pois as fibras do tecido impedem a deformação da matriz, além de funcionar como “defeito” o que leva a um menor alongamento. Deve-se ressaltar que os resultados de alongamento na ruptura são muito susceptível a erros, pois como se trabalha com material rígido, há uma tendência de

escorregamento dos corpos de prova durante o ensaio, principalmente com as garras utilizadas.

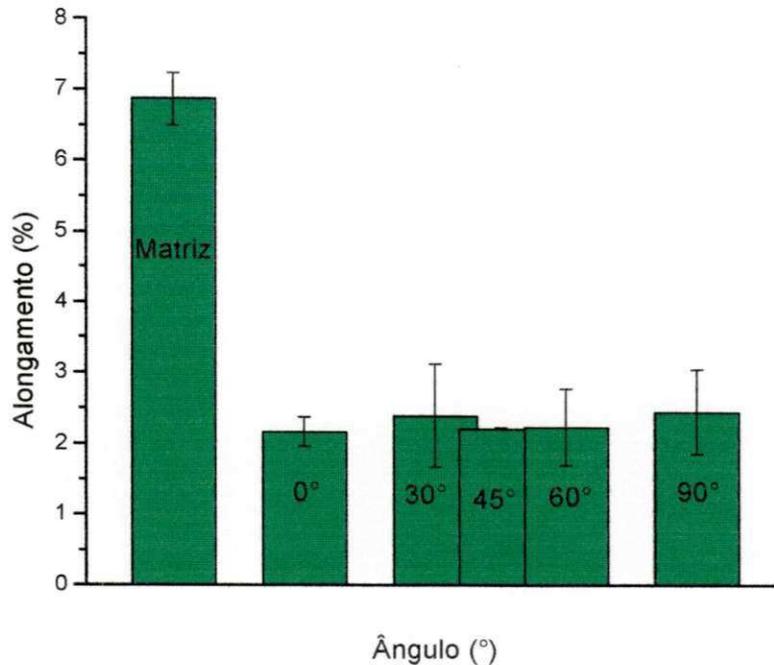


Figura 5 - Comportamento do Alongamento em função dos ângulos de ensaio, para compósitos com apenas uma camada de tecido tricotado e teor médio de fibra de $22,70\% \pm 4,76\%$

Ao se comparar as Tabelas 2 e 3, verifica-se que para duas camadas de tecido há um acréscimo na resistência à tração em relação àqueles compósitos com uma camada, indicando que para esta propriedade teor ótimo de fibra deve estar em torno de 40% em peso. Já o módulo elástico permaneceu praticamente inalterado, apenas havendo um aumento a 90° (carreiras – *course*) o que era de se esperar pois nesta direção tem-se a menor deformabilidade do tecido, diferente do que ocorre para uma camada onde o maior módulo ocorre a 0°. Para duas camadas houve um maior alongamento do que para uma camada. Isto pode ser atribuído ao fato de que com uma maior quantidade de fibra (tecidos) a dificuldade de molhamento aumenta, dificultando a interação entre as camadas de tecido e a resina, facilitando, desta forma, a deformação do tecido, antes da ruptura total do compósito. Em nenhum dos casos estudados com mais de uma camada houve uma quebra

catastrófica dos compósitos.

Na Figura 6, tem-se a comparação entre as propriedades listadas na Tabela 3 com os valores da matriz. Verifica-se que para teores de fibra aproximados a direção de 90° (carreiras - *course*) apresentou melhores resultados (em tensão na ruptura e módulo elástico) e um menor alongamento do que a 0° (cordões - *wale*). Isto pode ser explicado pelo fato de 90° se ter uma menor deformabilidade o que leva a uma maior tensão e módulo e um menor alongamento. Com duas camadas de tecido, as propriedades dos compósitos não ficam totalmente dependentes das propriedades da matriz havendo de forma mais efetiva a atuação do reforço, devido a isto tem-se uma menor queda na Tensão na Ruptura quando comparado a matriz, em relação ao compósitos com uma camada. O módulo elástico foi maior do que o da matriz polimérica, pelo mesmo motivo que para uma única camada, isto é devido a maior rigidez das fibras, e o maior valor foi obtido em 90° (carreiras - *course*). O alongamento foi cerca de 50% menor do que o da matriz, isto pode ser explicado pelo fato de se ter uma maior quantidade de fibra, o que dificulta o molhamento da mesma, e com duas camadas pode se ter uma maior deformação de uma camada do que de outra. Isto é, uma das camadas pode deformar mais do que a outra, fazendo com que o alongamento aumente.

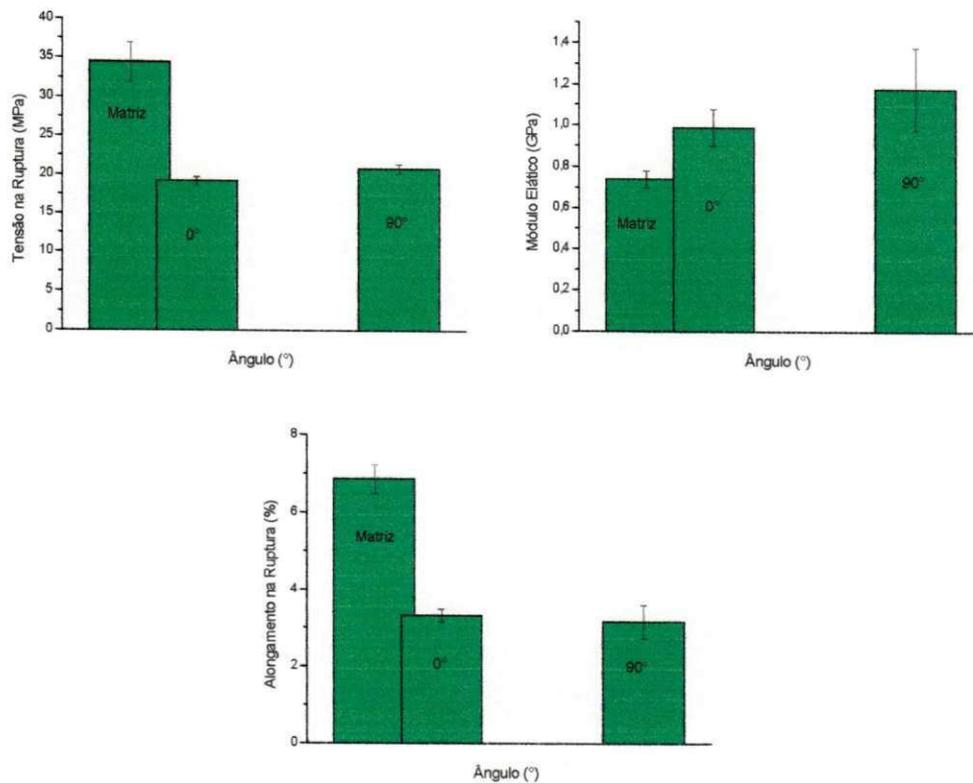


Figura 6 - Propriedades dos compósitos com duas camadas de tecido tricotado em relação à matriz, com teor de fibra de $40,95 \pm 0,78$ %

Na Tabela 4 estão mostrados os resultados obtidos para o compósito com 3 camadas de fibra, ensaiados na direção 0° (cordões - *wale*) e com teor de fibra em torno de 47%. Não foram realizados ensaios na direção 90° (carreiras - *course*) devido a problemas com o equipamento. Entretanto, era de se esperar que a 90° as propriedades dos compósitos em estudo, com três camadas, fossem um pouco superiores do que a 0° devido aos fatores citados anteriormente.

Na Figura 7 está mostrado os dados comparativos entre a resina poliéster e os compósitos com 3 camadas de tecido. Verifica-se que a tensão na ruptura, tal qual o módulo elástico é o menor nos três casos de compósitos estudados, com 1, 2 e 3 camadas. Este fato se deve, ao fato de que com três camadas têm-se, umas quantidades enormes de fibra, o que dificultou inclusive o fechamento do molde. Como o tecido tricotado, devido as suas reentrâncias,

apresenta uma dificuldade natural de molhamento (o tecido funciona como uma espécie de esponja), com três camadas essa dificuldade é triplicada. Com isso não há uma adesão muito boa entre as camadas fazendo com que haja delaminação das camadas do compósito. Devido a esta possível, delaminação, tem-se uma menor resistência à tração e um menor módulo, em relação àqueles com um e duas camadas. Isto também, explica o maior alongamento.

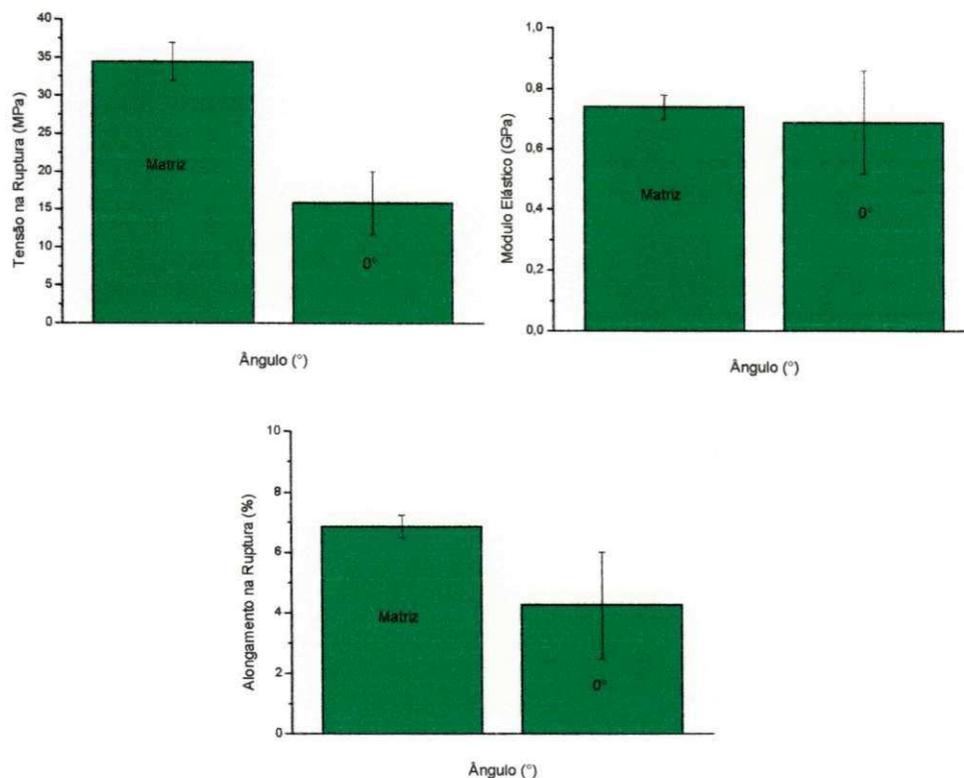


Figura 7 - Propriedades dos compósitos com três camadas de tecido tricotado em relação à matriz, com teor de fibra de $46,93 \pm 1,70$ %

Ao se comparar as Tabela 3, 4 e 5, assim como as Figuras 4, 5, 6 e 7, verifica-se que a tensão na ruptura aumenta com o teor de fibra até um valor máximo em torno de 40%, diminuindo para teores mais elevados. Comportamento é análogo ao observado em sistema afim reforçados por tecido tramado (CAVALCANTI, 2000). Atribui-se a queda na resistência à tração a elevados teores de fibra devido a dificuldades de impregnação da fibras, levando a vazios e defeitos. Ao contrário do que tem sido observado e

reportado para compósitos reforçados por tecidos tramados a base de juta, mesmo para teores elevados de fibras, a resistência dos compósitos reforçados por tecidos tricotados permanece inferior à da matriz. Este comportamento era previsto já que a arquitetura destes tecidos impede o alinhamento das fibras. O módulo elástico se mantém praticamente inalterado para os compósitos com uma e duas camadas, principalmente na direção 0° , o mesmo praticamente acontece a 90° , porém em todos os casos com uma e duas camadas o módulo dos compósitos foi superior a módulo da resina poliéster. Isto, apenas não aconteceu para o compósito com três camadas de tecido.

Em resumo, pode-se dizer, que para o tecido tricotado o teor ótimo de fibra deve estar próximo dos 40%, acima deste valor tem-se uma fragilização do compósito, e abaixo não há uma atuação efetiva do reforço. Entretanto, em todos os casos a resistência à tração foi menor do que a da matriz, devido ao não alinhamento das fibras na direção do esforço. A direção a 90° (*carreiras – course*) é a que apresenta o melhor balanço de propriedades; e, que para apenas uma camada melhores resultados foram conseguidos quando se utilizou o molde de 2mm.

5.2 Tecidos Tramados

O valores obtidos para os tecidos tramados estão sumarizados na Tabela 5. Vale lembrar que os compósitos com tecido tramado foram feitos em molde de 2mm de espessura e com fio 10/1, com duas e quatro camadas de tecido, para que se tivesse o mesmo teor de fibra que o tecidos tricotados, para futura comparação.

Tabela 5 – Valores de Tensão na ruptura, Módulo elástico e Alongamento para tecidos tramados em função do teor de fibra e do ângulo de ensaio

Teor de fibra, em peso (%)	Tensão na Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Alongamento (%)
0° - Urdume			
26,40 ± 2,60	23,04 ± 3,54	1,16 ± 0,09	3,43 ± 0,42
38,00 ± 1,90	36,40 ± 1,91	1,57 ± 0,14	5,13 ± 0,52
45°			
26,40 ± 2,60	22,16 ± 0,85	1,13 ± 0,10	4,37 ± 0,97
38,00 ± 1,90	27,03 ± 1,42	1,41 ± 0,06	2,75 ± 0,16
90° - Trama			
26,40 ± 2,60	23,09 ± 0,85	1,14 ± 0,14	3,50 ± 0,29
38,00 ± 1,90	40,04 ± 2,23	1,49 ± 0,16	3,80 ± 0,07

Ao se observar a Tabela 5 e a Figura 8, verifica-se que a introdução do tecido de juta na matriz poliéster provoca um decréscimo de cerca de 33% na resistência à tração dos compósitos com duas camadas de tecido de juta (26,40 ± 2,60%, em peso), para todos os ângulos ensaiados. Já para os compósitos com 4 camadas de tecido de juta (38,00 ± 1,90%, em peso) houve um pequeno aumento na tensão na ruptura principalmente a 90° (trama) onde o fios do tecido estão mais alinhados, diferentemente do urdume, pois os fios do urdume, tem um movimento ondulatório hora passando por cima, hora passando por baixo dos fios da trama. Entretanto há uma tendência para o aumento da resistência à tração, pois segundo CAVALCANTI (2000), para

teores de 51%, em peso, de fibra há acréscimos de 20 a 56% na tensão de ruptura. Comportamento análogo foi reportado por JOSEPH et al., 1999, para sistema afim, reforçado por tecidos híbridos algodão-juta e algodão-sisal. Segundo os autores quando tecidos tramados são utilizados como reforço, as fibras alinhadas ortogonalmente ao esforço agem com inclusões ou defeitos. A baixo teores de fibras, este efeito fica mais evidenciado, provocando um decréscimo na tensão de ruptura quando o compósito é solicitado longitudinalmente. Com teores mais elevados de fibra, as propriedades dos compósitos passam a ser dominadas pelas fibra e o tecido passa a atuar como elemento de reforço.

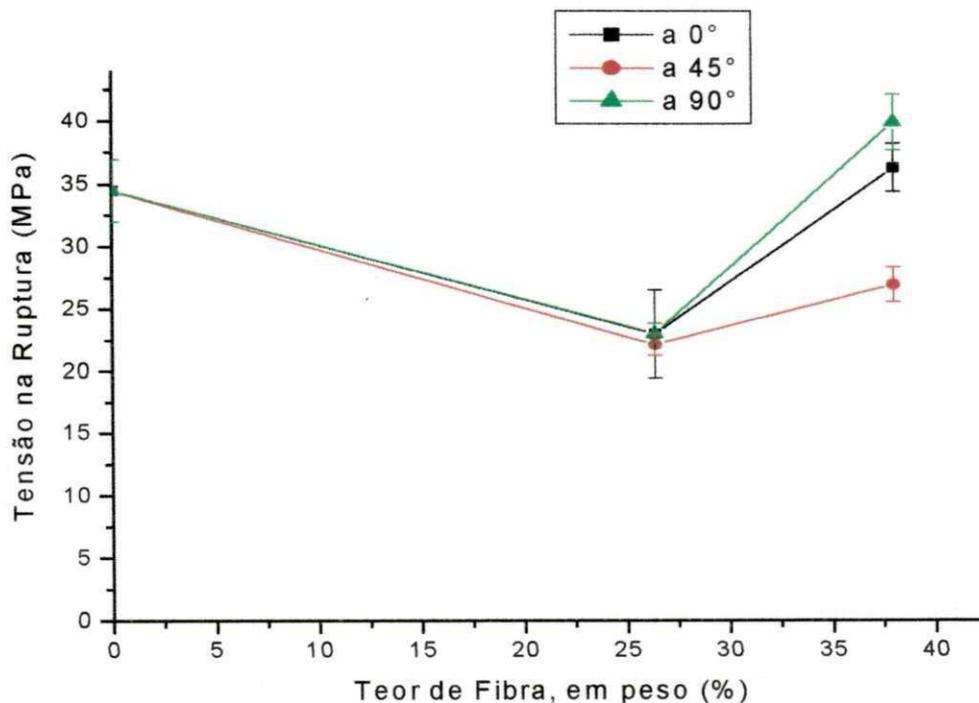


Figura 8 – Comportamento da Tensão na Ruptura em função do teor de fibra e dos ângulos de ensaio 0, 45 e 90°

Da Tabela 5 e Figura 9, verifica-se que o módulo de elasticidade aumenta com a incorporação de fibra para todos os ângulos investigados. Apresentando um aumento de cerca de 100% quando ao poliéster são adicionados duas camadas de tecido, independentemente do ângulo de ensaio. Para 4 camadas de reforço estes valores são cerca de 125% superiores aos da matriz, para todos os ângulos. Isto é tido como indicativo que a inclusão de

fibras no compósito aumenta a sua rigidez. Resultados semelhantes foram obtidos por CAVALCANTI (2000), NÓBREGA (2000) e JOSEPH (1999), os dois últimos trabalharam com compósitos híbridos juta-vidro e algodão-vidro, respectivamente, e a primeira trabalhou com o mesmo sistema utilizado neste trabalho. Este resultado já era esperado pois a resistência e o módulo das fibras utilizadas são superiores ao da matriz. Além disso, as fibras diminuem o movimento livre das cadeias poliméricas, resultando em um aumento no módulo de elasticidade.

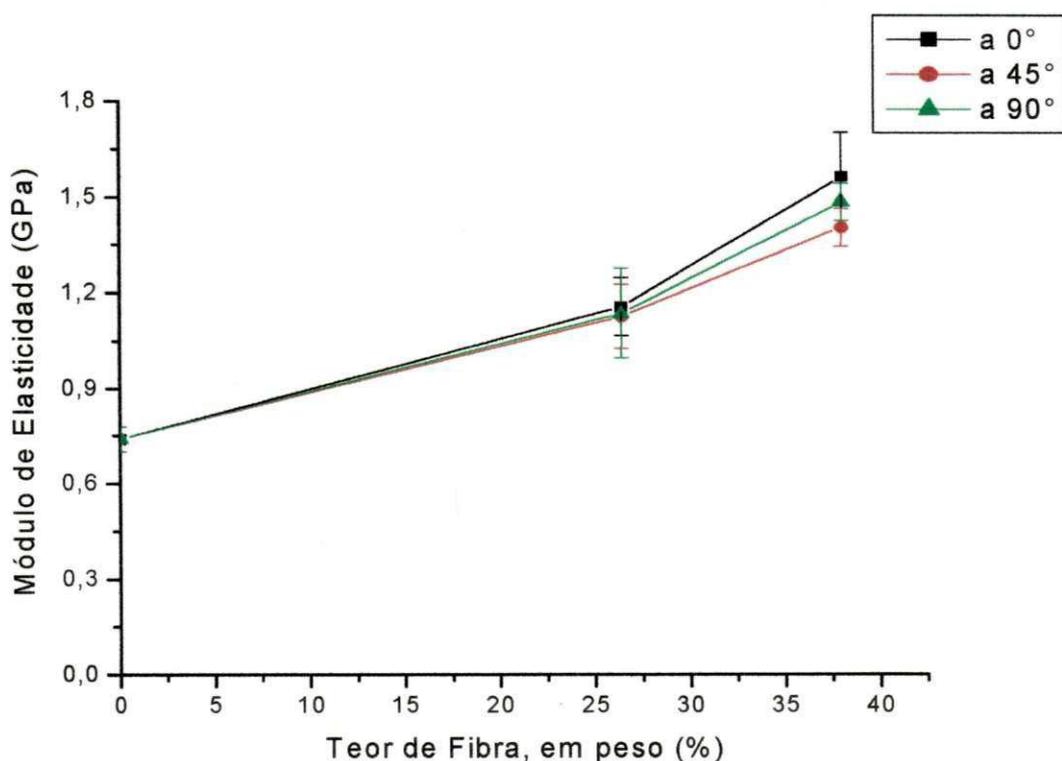


Figura 9 – Comportamento do módulo de elasticidade em função do teor de fibra e dos ângulos de ensaio 0, 45 e 90°

Através da Tabela 5 e Figura 10, verifica-se que o alongamento para os tecidos tramados, nos diversos ângulos, apresenta uma variação relativamente grande variando de 3,43 a 4,37%, para duas camadas e de 2,75 a 5,13% para quatro camadas. Entretanto, todos estes valores são menores do que o alongamento da matriz, que apresentou um alongamento em torno de 6,25%. Este comportamento, já era esperado, pois as fibras de juta são mais rígidas do

que a matriz polimérica. Verifica-se, também, que na direção da trama houve um aumento mais discreto no alongamento, com o aumento do teor de fibra, do que no urdume. Isto se deve, possivelmente, ao maior alinhamento das fibras na trama. No urdume (0°), devido ao movimento ondulatório dos fios, estes, antes de romperem, tendem a se tornarem mais orientados, devido a isto tem-se um aumento maior no alongamento. A 45° , esperava-se um comportamento análogo ao que aconteceu na trama e no urdume, isto é um maior alongamento para um maior teor de fibra e um menor para o menor teor de fibra. Contudo, este fato não ocorreu, talvez por, não ter nenhuma fibra alinhada na direção do esforço, e para um teor baixo de fibra (teor de fibra abaixo do teor ótimo) esta propriedade fosse controlada pela resina. Quando se aumenta o teor de fibra, duplicando-se a quantidade de camadas, a quantidade de fios não alinhados ao esforço também duplica, o que pode explicar a queda no alongamento para o teor de 38% de fibra. Ou seja, para teores baixos o alongamento é dominado pela resina, para teores mais elevados, onde a resina não domina a propriedade, os fios não alinhados, em maior número, funcionam com imperfeições.

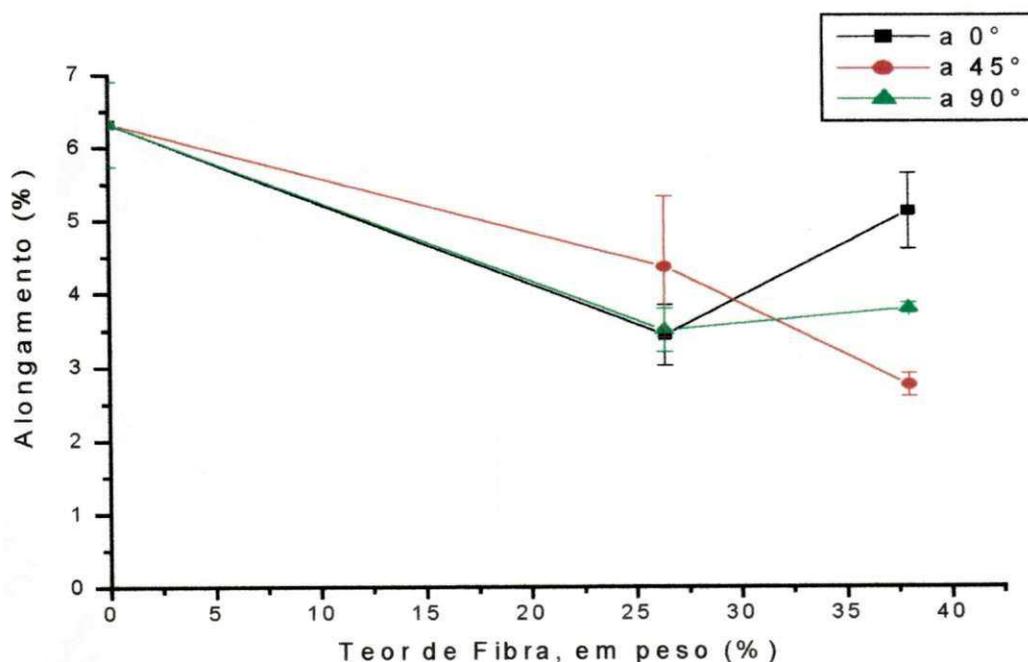


Figura 10 – Comportamento do alongamento em função do teor de fibra e dos ângulos de ensaio 0 , 45 e 90°

5.3 Tecido Tricotado x Tecido Tramado

Na Figura 11, têm-se a comparação dos tecidos tricotados e tramados, em teores próximos de fibra, os tricotados com uma e duas camadas e os tramados com duas e quatro camadas, nos ângulos de 0, 45 e 90°.

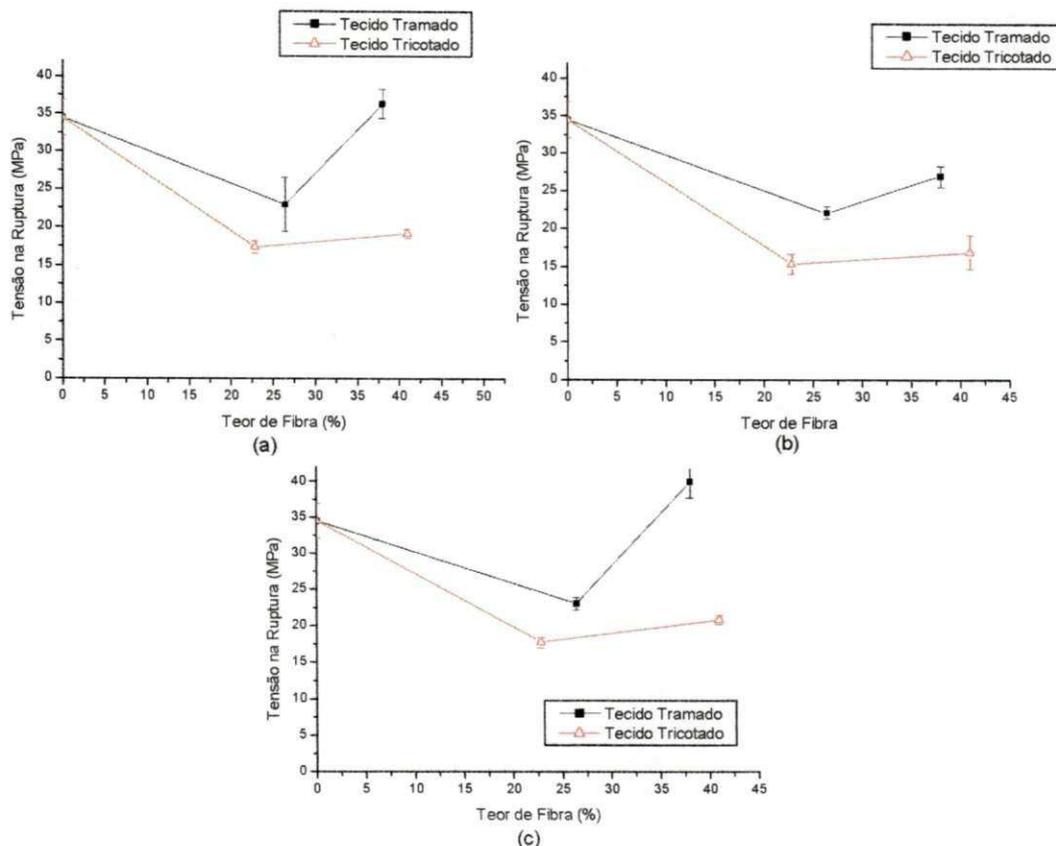


Figura 11 – Comportamento da tensão na ruptura em função do teor de fibra para os tecidos tricotados e tramados a: (a) 0°; (b) 45° e (c) 90°

Verifica-se que os compósitos que tinham como reforço o tecido tricotado, não só apresentaram menor resistência do que os reforçados por tecidos tramados quanto resistência inferior à da própria matriz. Este comportamento ocorre devido a arquitetura dos tecidos empregados. Nos compósitos reforçados pelo tecido de trama simples (plain weave) isto é, com os fios do urdume passando por cima e por baixo de cada fio da trama e vice-versa, ao se testar a amostra longitudinalmente à trama ou ao urdume, tem-se metade das fibras alinhadas na direção do esforço e a outra metade disposta

transversalmente ao esforço. Isto equivale a dizer que, neste tecido, durante o ensaio, metade das fibras é capaz de efetivamente transferir tensões enquanto a outra metade age como inclusões ou defeitos. Nos compósitos reforçados pelos tecidos tricotados isto não ocorre pois estes tecidos consistem de laçadas sucessivamente interconectadas, com a formação de um nó entre cada laçada, de modo que as fibras não se encontram alinhadas na direção do esforço. Este é o motivo pelo qual, mesmo a elevados teores de fibras, os compósitos reforçados pelos tecidos tricotados apresentam propriedades inferiores às da matriz, ao contrário do que acontece com os tecidos tramados. Quando sob tensão, a falha do compósito reforçado pelo tecido tricotado, em geral, resulta da ruptura da fibra em pontos de trespasse (*cross-over*) dos fios ou então nos lados das pernas das laçadas do tricô que correspondem respectivamente a regiões de alta concentração de tensões ou a planos com mínima concentração de fibras. Para um laminado multi-camadas, a tensão máxima de ruptura é precedida por fissuramento múltiplo da matriz. Em compósitos reforçados por tecidos tramados, a falha ocorre primeiramente na matriz. Vale salientar que, enquanto a ruptura nos compósitos reforçados por tecidos tramados foi completa, a dos reforçados pelos tecidos tricotados, apesar de terem menor resistência à tração, não foi catastrófica, isto é, algumas fibras, mesmo após a ruptura, ainda mantinham os corpos de prova coesos.

Fica evidenciado (Figura 11) que, independente da arquitetura do tecido utilizado como reforço, a resistência à tração de todos os compósitos investigados aumenta com o teor de fibras. No caso dos tecidos tramados, a teores elevados de fibra, a resistência dos compósitos supera a da matriz enquanto que, para os tecidos tricotados, tal não acontece, inclusive diminuindo fortemente a teores de fibra superiores a 42% em peso, o que é atribuído a dificuldades de molhamento das fibras a teores muito elevados de reforço. Resultados análogos foram reportados (CAVALCANTI, 2000; JOSEPH & CARVALHO, 1999) para compósitos semelhantes reforçados por tecidos tramados híbridos ou não.

A Figura 12 mostra que com a inclusão de fibras, seja na forma de tecidos tramados ou tricotados eleva o módulo elástico de todos os compósitos

investigados.

O módulo de elasticidade, dos compósitos reforçados pelo tecido tramado tendeu a aumentar levemente com o teor de fibras enquanto que, o dos reforçados pelo tecido tricotado manteve-se praticamente constante, decrescendo a teores de fibra maiores do que 42% em peso o que pode ser atribuído à falta de orientação das fibras na direção do esforço para os tecidos tricotados e à dificuldades no molhamento das fibras pela matriz a elevados teores de reforço.

Os resultados obtidos mostram que, o ângulo de ensaio, praticamente não influenciou o módulo dos compósitos reforçados pelos tecidos tramados. Isto foi atribuído ao fato que nestes tecidos, os fios da trama e do urdume se alternam em movimento de vai e vem, com um fio passando por cima e por baixo do outro em um sistema onde todos os fios têm as mesmas dimensões. Em estudo anterior (JOSEPH & CARVALHO, 1999), realizado em compósitos híbridos algodão/juta, tendo algodão no urdume, resultados distintos haviam sido reportados pois enquanto o módulo dos compósitos reforçados por tecidos aumentou com o teor de fibras na direção da trama, este diminuiu na direção do urdume. A explicação para esta discrepância pode ser atribuída ao fato de que, naqueles tecidos, o calibre dos fios dipostos no urdume (algodão) e na trama (juta 10/2) era muito distinto, o que fazia com que os fios no urdume apresentassem um movimento oscilatório considerável enquanto que os fios da trama encontravam-se perfeitamente alinhados. No tecido de juta utilizado neste trabalho, tem-se o mesmo fio na trama e no urdume, o que faz com que não haja diferenças de alinhamento nas duas direções e, portanto, que as propriedades do compósito sejam praticamente isotrópicas, na direção da trama (90°) e urdume (0°). A 45°, por não se ter nenhuma fibra alinhada na direção do esforço, tem-se propriedades piores do que os ângulo de 0 e 90°.

No caso dos compósitos reforçados pelo tecido tricotado, o módulo dos compósitos testados na direção dos cordões foi levemente inferiores (principalmente para teores elevados de fibra) ao dos testados na direção das carreiras. Esta diferença em desempenho é atribuída à arquitetura do tecido e à forma de conexão entre as laçadas. O tecido tricotado deforma mais facilmente ao longo dos cordões (*wale*) do que as carreiras (*course*) e,

portanto, o módulo dos compósitos por eles reforçados, tende a ser inferior quando testado naquela direção (cordões).

Ao se comparar os módulos dos compósitos reforçados pelos dois tipos de tecidos, verifica-se que os de tecido tramado apresentaram módulo um pouco superior em todas as direções estudadas, o que pode ser atribuído à menor deformabilidade do tecido tramado.

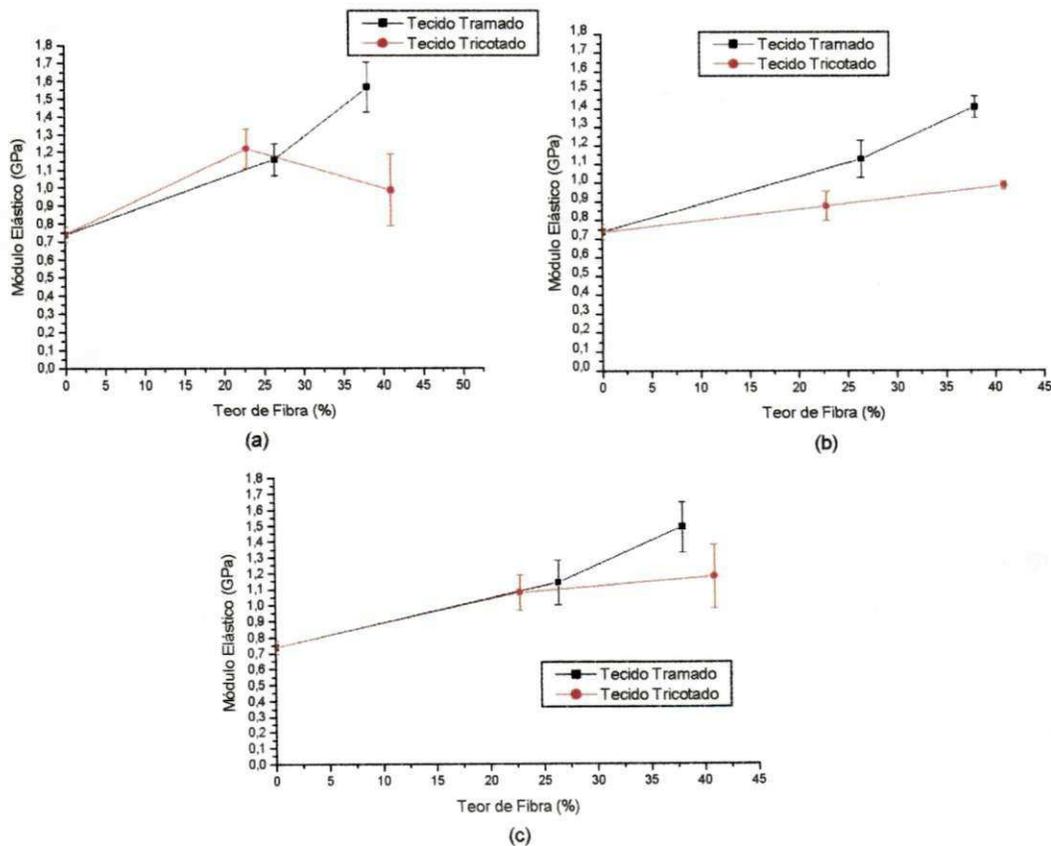


Figura 12 - Comportamento do módulo elástico em função do teor de fibra, em peso, para os tecidos tricotados e tramados a: (a) 0°; (b) 45° e (c) 90°

5.4 Resistência ao Impacto – Tecido Tramado x Tricotado

Os resultados de resistência ao impacto dos compósitos, relativo à matriz, para todos os compósitos investigados são apresentados na Tabela 6. Os dados são reportados de maneira relativa porque, parte deles, foi confeccionado com outro lote de resina que, apesar de ter a mesma especificação, apresentou propriedades distintas. Deve-se salientar também que como os compósitos com tecidos tramados foram feitos com moldes de dois milímetros de espessura, a área transversal do corpo de prova de impacto é bem menor do que aqueles feitos nos moldes de três milímetros, com isso a resistência ao impacto que é a energia por área, tende a ser maior para os compósitos com menor espessura.

Tabela 6 - Resistência ao impacto, para os tecidos tramados e tricotados

Tipo de Tecido	Número de Camadas	Teor de Fibra (%), em peso	Aumento relativo da resistência ao impacto (%)		
			0°	45°	90°
Tramado	02	24,9 ± 0,5	157,1±13,1	115,5±13,9	150,4±18,6
Tramado	02	38,0 ± 1,9	340,7±17,9	288,8±10,6	370,8±15,2
Tricotado	01	24,9±5,9	167,7±32,8	163,1±25,0	165,4±44,7
Tricotado	02	40,9±0,8	384,9±12,1	315,1±25,0	351,0±26,5
Tricotado	03	46,0 ± 1,1	521,0±32,8	480,1±22,5	510,8±20,3

Os resultados indicam que, como previsto, a resistência ao impacto de todos os compósitos investigados aumenta com o teor de fibra ou com o número de camadas de tecido e que, na direção da trama para os tecidos tramados e na direção dos cordões para os tecidos tricotados, a resistência ao impacto tende a ser um pouco mais elevada. Uma ressalva deve ser feita, como o alongamento da resina foi muito superior ao dos compósitos em estudo, era de se esperar que esta apresentasse uma maior resistência ao impacto. Entretanto, como foi citado anteriormente, houve um escorregamento

das garras durante o ensaio de tração, principalmente nos ensaios com a matriz polimérica. Desta forma o erro experimental para o alongamento foi maior nos ensaios com a resina poliéster do que nos compósitos.

Os dados evidenciam que a resistência ao impacto dos compósitos reforçados por tecidos tricotados é superior à dos reforçados pelos tecidos tramados. Este comportamento é atribuído à maior capacidade de absorção de energia dos tecidos tricotados. As fibras que impedem a propagação das trincas e fazem com que a frente de propagação, ao encontra-las seja desviada e multiplicada em frentes de propagação com menor energia, retardando a falha (KESKULLA & PAUL, 1993). Estudos demonstram que em compósitos reforçados por tecidos tricotados, a natureza destes tecidos promove a união das superfícies de fratura, podendo levar à tenacidades à fratura até 5 vezes superiores à de compósitos semelhantes reforçados por tecidos tramados de fibra de vidro (KESKULLA & PAUL, 1993). Na região do impacto, o dano aparece com uma região de fissuras muito densas e de padrão complexo enquanto que, fora da zona de impacto, é caracterizada por uma série de micro-fissuras radialmente distribuídas ao redor de uma zona densamente danificada.

A dependência da resistência ao impacto dos compósitos testados em diferentes direções, isto é, na direção da trama ou dos cordões para os tecidos tramados e tricotados, respectivamente, é atribuída à anisotropia destes tecidos bem como ao fato das suas propriedades estarem diretamente ligadas à densidade relativa das fibras em cada direção de teste e, no caso dos tecidos tricotados, ao tamanho do ponto do tricô.

Os dados indicam também que, nos compósitos testados a 45° e reforçados por tecidos tricotados as propriedades de impacto foram equivalentes às obtidas nas outras direções enquanto que as de tecidos tramados tenderam a ser inferiores. Novamente, esta diferença de comportamento é atribuída às diferentes arquiteturas dos tecidos utilizados. Os tecidos tricotados não apresentam uma região de orientação preferencial tão acentuada quanto a dos tecidos tramados, o que resulta numa menor dependência de suas propriedades mecânicas com a direção do teste.

5.5 Pós-cura

Foi realizado somente com o tecido tricotado. Este tratamento teve como objetivo, melhorar as propriedades mecânicas dos referidos compósitos. Na Tabela 7, está mostrado um estudo comparativo entre os compósitos pós-curados e os sem tratamento.

Tabela 7 – Comparação entre os compósitos com e sem pós cura

Teor de Fibra (%)	Número de Camadas	Angulo de Corte (°)	Tensão na Ruptura (MPa)		Alongamento na Ruptura (%)		Módulo Elástico (GPa)	
			S/cura	Pós-cura	S/cura	Pós-cura	S/cura	Pós-cura
23,70± 0,35	01	0	16,85± 2,07	16,51± 2,37	2,02± 0,32	2,00± 0,13	1,29± 0,06	1,32± 0,10
		90	17,76± 1,37	20,04± 1,58	2,45± 0,30	2,23± 0,08	1,08± 0,11	1,36± 0,02
33,50	01	0	19,94± 1,38	21,96± 2,27	2,14± 0,33	2,00± 0,30	1,60± 0,14	1,74± 0,06
40,40	02	0	20,91± 0,59	23,71± 1,75	3,17± 0,44	3,33± 0,59	0,99± 0,09	0,93± 0,05

Os dados da Tabela 7, evidenciam que o processo de pós-cura em geral, melhorou as propriedades em estudo, entretanto este aumento não foi muito significativo, ficando em alguns casos inferiores ao erro experimental (algo em torno de 10%). Todavia, em quase todos os casos houve um aumento na resistência à tração, ou quando isto não ocorreu o valor de resistência à tração ficou muito próximo do valor sem o tratamento. O aumento médio na resistência à tração após a pós-cura foi de 10,8%. No módulo elástico, o comportamento foi semelhante, houve aumento em praticamente todos os casos estudados, o aumento variou de 2,3 a 20,6%. Quanto ao alongamento

houve uma diminuição em quase todos os casos. Este comportamento era o esperado, pois com o processo de pós-cura, aquelas ligações que ficaram incompletas durante o processo de cura são completadas, com isso, tem-se uma maior rigidez da estrutura, o que leva a um aumento na resistência à tração e módulo elástico e uma diminuição no alongamento.

5.6 Modelagem Matemática

De acordo com os dados obtidos nos ensaios de tração, principalmente os módulos elásticos (Tabela 2), foram calculados os seguintes valores: $S_{11}^{(0^\circ)}$ e $S_{11}^{(45^\circ)}$. Utilizando para isto a definição da componente da matriz *compliance* que é a deformação dividida pela tensão. Para tanto foram utilizados três valores fixos de deformação 0,4, 0,5 e 0,6mm. Estes valores foram escolhidos, devido ao fato de que em todos os ensaios realizados no cálculo do módulo de elasticidade continha pelo menos duas dessas deformações. Posteriormente, foi feito o cálculo de $S_{12}^{(0^\circ)}$, $S_{12}^{(45^\circ)}$, utilizando para isto a variação do coeficiente de Poisson.

Aplicando-se os resultados obtidos na Equação 1, na qual a matriz A é composta apenas por senos e cosenos, tendo-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} S_{11}^{(0^\circ)} &= S_{xx} \\ S_{12}^{(0^\circ)} &= S_{xy} \\ S_{11}^{(45^\circ)} &= 0,25 S_{xx} + 0,25 S_{yy} + 0,25 S_{xy} + 0,25 S_{ss} \\ S_{12}^{(45^\circ)} &= 0,25 S_{xx} + 0,25 S_{yy} + 0,5 S_{xy} - 0,25 S_{ss} \end{aligned}$$

Desta forma tem-se a seguinte matriz *compliance*:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0,25 & 0,25 & 0,50 & -0,25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{xy} \\ S_{ss} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{11})^{0^\circ} \\ (S_{11})^{45^\circ} \\ (S_{12})^{0^\circ} \\ (S_{12})^{45^\circ} \end{bmatrix}$$

Equação 2 – Matriz *compliance* para 0 e 45°

Com os valores da matriz *compliance*, e os resultados de $S_{11}^{(\theta k)}$ e $S_{12}^{(\theta k)}$,

obtidos para os diferentes valores do coeficiente de Poisson, pode-se calcular os valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} . Com estes valores, calcular-se, então os valores de $S_{11}^{(30^\circ)}$, $S_{11}^{(60^\circ)}$ e $S_{11}^{(90^\circ)}$, comparando-os, posteriormente, com os valores obtidos na prática. Quando houver uma coincidência de resultados significa que o coeficiente de Poisson é o procurado. Com este valor do coeficiente de Poisson é possível fazer projeções para os demais ângulos, bem como encontrar os demais valores.

Na Tabela abaixo estão mostrados os resultados obtidos para os valores de $S_{11}^{(\theta)}$, com θ , variando de 30, 60 e 90°, com os valores do coeficiente de Poisson variando de 0,27 a 0,32. Estes resultados são comparados com os resultados obtidos na prática, com deformação de 0,4; 0,5 e 0,6 mm.

Tabela 8 – Valores teóricos para S_{11} em função do ângulo e do coeficiente de Poisson, para 0,4, 0,5 e 0,6 mm de deformação

Para 0,4 mm de alongamento ou 0,00667 de deformação:

v	$S_{11} \text{ (MPa)}^{-1}$		
	30	60	90
0,27	0,0016492	0,0022117	0,0025700
0,28	0,0016497	0,0022200	0,0025833
0,29	0,0016507	0,0022283	0,0025967
0,30	0,0016515	0,0022367	0,0026100
0,31	0,0016525	0,0022433	0,0026250
0,32	0,0016535	0,0022517	0,0026400

Para 0,5mm de alongamento ou 0,00833 de deformação:

v	$S_{11} \text{ (MPa)}^{-1}$		
	30	60	90
0,27	0,0012658	0,0013600	0,0014083
0,28	0,0012668	0,0013657	0,0014175
0,29	0,0012683	0,0013700	0,0014233
0,30	0,0012700	0,0013750	0,0014300
0,31	0,0012715	0,0013793	0,0014358
0,32	0,0012730	0,0013838	0,0014417

Para 0,6mm de alongamento ou 0,01 de deformação:

v	$S_{11}(\text{MPa})^{-1}$		
	30	60	90
0,27	0,0011768	0,0013089	0,0013924
0,28	0,0011783	0,0013183	0,0013983
0,29	0,0011798	0,0013227	0,0014042
0,30	0,0011807	0,0013277	0,0014125
0,31	0,0011822	0,0013322	0,0014183
0,32	0,0011835	0,0013365	0,0014242

Tabela 9 – Valores experimentais para S_{11} em função do ângulo e da deformação

para 30°

deformação relativa	Tensão (MPa)	S_{11} = deformação/tensão (MPa) ⁻¹
0,00667	4,0614 ± 0,5089	0,0016415 ± 0,0002051
0,00833	5,4842 ± 0,6752	0,0015195 ± 0,0001870
0,01000	6,8573 ± 0,8598	0,0014583 ± 0,0002473

para 60°

deformação relativa	Tensão (MPa)	S_{11} = deformação/tensão (MPa) ⁻¹
0,00667	4,3970 ± 0,8595	0,0015162 ± 0,0002963
0,00833	6,1219 ± 0,8863	0,0013612 ± 0,0001970
0,01000	8,2120 ± 0,9728	0,0012177 ± 0,0001441

para 90°

deformação relativa	Tensão (MPa)	S_{11} = deformação/tensão (MPa) ⁻¹
0,00667	4,8320 ± 0,6303	0,0013797 ± 0,0001798
0,00833	6,6500 ± 0,5776	0,0012532 ± 0,0001088
0,01000	8,3020 ± 0,4982	0,0012117 ± 0,0000625

Ao se comparar os valores teóricos (Tabela 8) para os diferentes coeficientes de Poisson com os valores efetivamente medidos (Tabela 9), verifica-se que para a deformação para o ângulo de 30° os valores que mais se aproximam são àqueles obtidos para uma deformação de 0,4mm e com um coeficiente de Poisson de 0,27. Para 60°, os valores são 0,5mm e 0,27, respectivamente para a deformação e coeficiente de Poisson, respectivamente. Em 90°, os valores que mais se aproximam são 0,5mm de deformação e um coeficiente de Poisson 0,27. Desta forma, pode-se concluir que o coeficiente de Poisson mais provável, para este sistema (resina poliéster/tecido de juta, tricotado) é algo em torno de 0,27. Com base neste coeficiente esta mostrado no Figura 13, o comportamento da componente *compliance* S_{11} para os ângulos de 30, 60 e 90°.

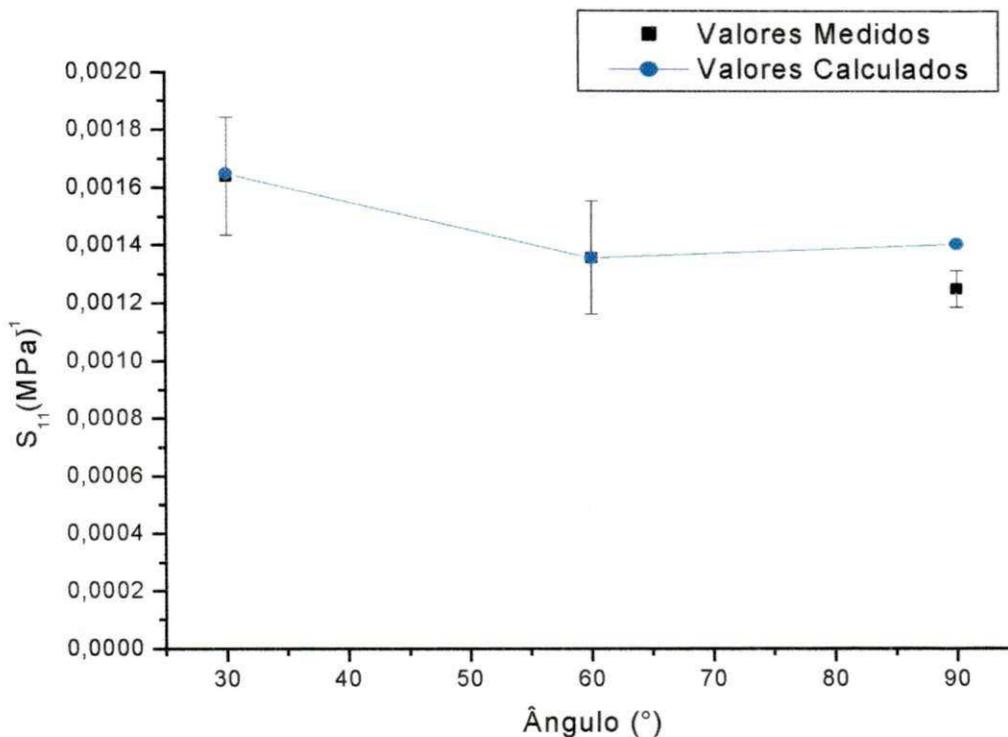


Figura 13 – Comportamento da componente S_{11} para os diversos ângulos

Como os valores de 0 e 45°, foram utilizados para o cálculo dos demais ângulos, o valor de S_{11} para estes ângulos são idênticos aos medidos.

Estando o coeficiente de Poisson em torno de 0,27, pode-se determinar os valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} . Sendo assim tem-se, para 0,4; 0,5 e 0,6 de

deformação:

Tabela 10 – Variação dos valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} em função das deformações

	Deformação (mm)		
	0,4	0,5	0,6
$S_{xx} \text{ (MPa)}^{-1}$	0,0014417	0,0012200	0,0011183
$S_{yy} \text{ (MPa)}^{-1}$	0,0025667	0,0014083	0,0013933
$S_{xy} \text{ (MPa)}^{-1}$	0,0003900	0,0003300	0,0003017
$S_{ss} \text{ (MPa)}^{-1}$	0,0028350	0,0019617	0,0018550

Desta forma tem-se que o módulos elásticos E_{xx} , E_{yy} , E_{xy} e S_{ss} , podem estar, variando dentro da seguinte faixa:

E_{xx} está entre 0,894 à 0,693 GPa;

E_{yy} está entre 0,717 à 0,389 GPa;

E_{xy} está entre 3,314 à 2,564 GPa; e

G está entre 0,539 à 0,352 GPa.

CAPÍTULO VI

6.0 CONCLUSÕES

Os objetivos propostos deste trabalho foram:

1. verificar o comportamento mecânico de compósitos poliéster/tecido de juta, tricotado e tramado, em função do teor de fibra e do ângulo de ensaio;
2. analisar as propriedades de impacto dos dois tipos de compósitos;
3. observar o efeito da pós-cura nos compósitos reforçados com tecido tricotado;
4. calcular os módulos elásticos e de cisalhamento, através da modelagem matemática.

Os resultados demonstraram que:

- Os compósitos com tecido tricotado apresentaram uma menor resistência à tração do que a matriz polimérica. Entretanto, a resistência aumentou com o teor de fibra até cerca de 40% (em peso) – 2 camadas de tecido, sofrendo um decréscimo para teores mais elevados;
- O módulo elástico em todos os compósitos estudados (com tecido tricotado e tramado), em todos os casos estudados foram superiores ao da matriz, sendo que em geral os do tecido tramado foram superiores aos dos com tecidos tricotados;
- O alongamento de todos os compósitos avaliados (tecido tricotado e tramado) foram inferiores aos da matriz, sendo que os com tecidos tricotados apresentaram um maior alongamento;
- A 90° (carreiras – *course*), houve um melhor balanço de propriedades para os compósitos com tecido tricotado, o mesmo aconteceu para os tecidos tramados na direção da trama;

- Os compósitos com tecido tramado apresentaram propriedades mecânicas (resistência à tração e módulo elástico) superiores aos do com tecidos tricotados, e os melhores resultados foram obtidos com 38% de fibra (em peso);
- A resistência ao impacto foi superior nos tecidos tricotados do que nos compósitos com tecido tramado, sendo o aumento da resistência ao impacto proporcional ao aumento no teor de fibra, em ambos os casos;
- A pós-cura elevou em cerca de 10% a resistência à tração, e o módulo elástico teve um aumento variando entre 2,3 e 20,0%;
- Os valores obtidos são consistentes, pois os valores experimentais foram próximos dos valores teóricos, e os módulos elásticos e de cisalhamento, apresentaram os seguintes valores para um coeficiente de Poisson de 0,27, $E_{xx} = 0,894 \text{ GPa}$, $E_{yy} = 0,717 \text{ GPa}$, $E_{xy} = 3,314 \text{ GPa}$ e $G = 0,539 \text{ GPa}$.

6.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Verificar a influencia da secagem e de tratamentos químicos nos tecidos tricotados;
- Fazer um estudo comparativo entre o molde de 2 e 3 mm, variando o tempo de fechamento do molde;
- Estudar compósitos mistos, com camadas de tecidos tramados intercalados com os tricotados;
- Modificar fio do tecido tricotado, isto, verificar se com um fio 10/1 o comportamento é o mesmo;
- Estudar a absorção de água no tecido tricotado;
- Verificar a consistência da modelagem matemática, fazendo-se ensaios com extensômetros.

CAPÍTULO VII

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, G. S., Desenvolvimento de compósitos poliéster/juta: um estudo comparativo, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campina Grande, 1994.
- BARKAKATY, B. C., Some Structural Aspects of Sisal Fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 20, 2921, 1976.
- BATISTA, W. W., Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/Juta: Efeitos de Tratamentos Superficiais, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campina Grande, 1995.
- BHARDURI, S. K.; MATHEW, M. D.; DAY, A. & PANDEY, S. N.: Thermal-Behaviour of Jute Fibre and its Components. 1. DSC Studies, *Cellulose Chemistry and Technology*, Vol. 4, No. 28, 1994.
- BHARDURI, S. K.; MATHEW, M. D.; DAY, A. & PANDEY, S. N.: Thermal-Behaviour of Jute Fibre and its Components. 2. Thermogravimetric Studies, *Cellulose Chemistry and Technology*, Vol. 6, No. 28, 1994.
- BLEDZKI A. K. & GASSAN J., Composites Reinforced with Cellulose Based Fibers, *Progress in Polymer Science*, vol. 24, p. 221-274, 1999.
- CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, A. & SANTOS, M. A.: Efeitos de uma Modificação Superficial e Ansorção de Água nas Propriedades de Compósitos Unidirecionais Poliéster/Juta, 13º CBECIMAT, Curitiba, 1998.
- CARVALHO, L. H., JOSEPH, K. & NÓBREGA, M. M. S., Reforços híbridos em

- compósitos poliéster/fibras vegetais. In: Simpósio Argentino de Polímeros, Cordoba, 1999. Anais. Cordoba – Argentina, p. 67-71, 1999.
- CAVALCANTI, V. S., Propriedades Mecânicas e Térmicas de Compósitos Poliéster/Juta: Efeitos de Tratamentos Superficiais, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campina Grande, 2000.
- CHAWLA, K. K. & BOSTOS, A. C., Proceedings of Third International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Pergamon Press Cambridge, vol. 3, p.191, 1979.
- CLARK, R. A. & ANSELL, M. P., Jute and glass fibre hybrid laminates, Journal of Materials Science, 21, 269-276, 1986.
- COSTA, R., Compósitos Poliéster-Juta: Efeitos de Modificações Químicas no Reforço e na Matriz Poliéster, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Campina Grande, 1997.
- D'ALMEIDA, J. R. M., Propriedades Mecânicas de Fibra de Juta, Ciência e Cultura, 39 (11), 1032 – 1025, 1987
- DAVIAUD, R. & FILLIATRE, C., Introduction aux Materiaux Composites -1. Matrices Organiques, École D'Automne du CNRS, Bombannes, 1983.
- DENG, S.; YE, L.; MAY, Y.-W., LIU, H.-Y.: Evaluation of Fibre Strength and Fibre/Matrix Adhesion Using Single Fibre Fragmentation Tests, Composites, Vol. 29A, Part A, 1998.
- GEORGE, E. L., Applied Textiles, 6th edn. The Van Nostrand Reinhold, New York, 1961.
- GIBSON, R. F., Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, International Editions, Singapore, 1994.
- GOMMERS, B., VERPOEST, I. & VAN HOUTIE, P., Determination of Mechanical Properties of Composite Materials by Tensile Tests. Part I: Elastic Properties, Journal of Composite Material, vol. 32, p. 310-334, No. 4/1998.
- GOMMERS, B., VERPOEST, I. & VAN HOUTIE, P., Determination of Mechanical Properties of Composite Materials by Tensile Tests. Part II: Strength Properties, Journal of Composite Material, vol. 32, p. 102-122, No. 2/1998.

- GOWDA, T. M., NAIDU, A. C. B., CHHAYA, R., Some Mechanical Properties of Untreated Jute Fabric-Reinforced Polyester Composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 1999, 277 – 284.
- HAJE Jr., E., *Compósitos e Blendas Poliméricas*, Instituto Latino-Americano de Tecnologia e IBM, Campinas – SP, 1989.
- HULL, D. & CLYNE, T. W., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge Solid State Science Series, Second Edition, Cambridge, 1996.
- JOSEPH, K. & THOMAS, S.: Effect of Chemical Treatment on the Tensile Properties of Short Sisal Fibre-Reinforced Polyethylene Composites, *Polymer*, No. 23, 1996.
- JOSEPH, K., PAVITHRAN, C., THOMAS, S. & BRAHMAKUMAR, M.: Tensile Properties of Short Sisal Fibre - Reinforced Polyethylene Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 47, 1993.
- JOSEPH, K.; THOMAS, S. & PAVITHRAN, C.: Effect of Ageing on the Physical Properties of Sisal - Fibre- Reinforced Polyethylene Composites, *Comp. Science and Technology*, Vol. 53, 1995.
- JOSEPH, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; THOMAS, S.; PRASANACURAMI, L.; KOSHY, P. & PAVITHRAN, C.: Influence of Interfacial Adhesion on the Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Short Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites, *European Polymer Journal*, Vol. 32, No. 10, 1996.
- JOSEPH, K. e CARVALHO, L. H. - Propriedades de compósitos de poliéster insaturado/tecidos híbridos de juta-algodão, V Congresso Brasileiro de Polímeros, Águas de Lindoia, São Paulo, p.834-839, 1999.
- KESKULLA, H. e PAUL, D. R. – Rubber toughening of thermoplastic polymers, II Congresso Brasileiro de Polímeros, S. Paulo, p. 494-498, 1993.
- LEONG, K. H., RAMAKRISHNA, S., HUANG, Z. M., G. A. BIBO, The Potential of Knitting for Engineering Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 200, 197 – 220.
- MEDEIROS, E. S & CARVALHO, L. H., Efeito do Envelhecimento Térmico na Propriedades Tênsis de Compósitos Poliéster/Juta Pultrusados, In: 5º Congresso Brasileiro de Polímeros, Águas de Lindoia, Anais. São Paulo, ABPol, 724 – 725, 1999.

- MILLER, E., *Textiles: Properties and Behaviour*, Bastford, London, 1973.
- MITRA, B. C.; BASAK, R. K. & SARKAR, M.: *Studies on Jute-reinforced Composites, its Limitations, and some Solutions through Chemical Modification of Fibres*, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.6, Nº 67, 1998.
- MOHANTHY, A. K. & MISRA, M., - *Studies on Jute Composite – A Literature Review*, *Polymer Plastics Technol. Eng.*, 34 (5), 729, 1995.
- MORASSI, O. J., *Fibras Naturais, Aspectos Gerais e Aplicação na Indústria Automobilística*, 11º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 1259 – 1262, 1995.
- NÓBREGA, M. M. S., *Propriedades de Compósitos Poliéster/Tecido Híbrido Fibra de Juta – Fibra de Vidro*, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campina Grande, 2000.
- PAL, P. K.: *Jute Reinforced Plastic: a Low Cost Composite Material*, *Plastics and Rubber Processing and Applications*, Vol. 4, (1984).
- POWELL, P. C., *Engineering With Polymers*, Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London, 1983.
- QUIRINO, A. P., *Cordões de Sisal Como Reforço em Compósitos de Matriz Poliéster*, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campina Grande, 1997.
- RAMAKRISHNA, S. & HULL, D., *Tensile Behavior of Knitted Carbon Fiber – Fabric/Epoxy Laminates: II Prediction of Tensile Properties*. *Composites Science and Technology*, 1994,50, 249-268.
- RICCIERI, J. E.; VAZQUEZ, A.; COSTA, R.; QUIRINO, A. P. & CARVALHO, L. H.: *Interfacial Properties of Unidirectional Composites Based on Jute and Sisal Fibres and Unsaturated Polyester Resin*, Mar del Plata, 1999.
- RUDD, C. D., OWEN, M. J. & MIDDLETON, V., *Mechanical Properties of weft Glass Fibre/Polyester Laminates*, *Composites Science and Technology*, 1990,39, 261-277.
- ROE, P. J. & ANSEL, M. P.: *Jute-Reinforced polyester Composites*, *Journal of Materials Science*, Vol. 20, (1985).

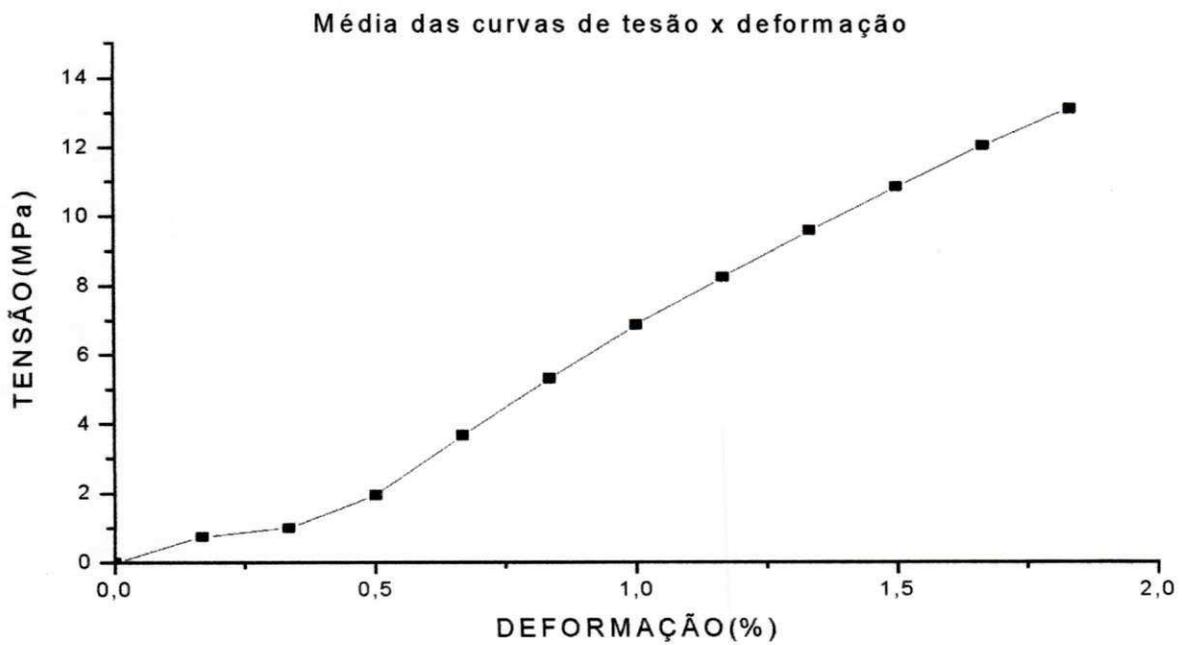
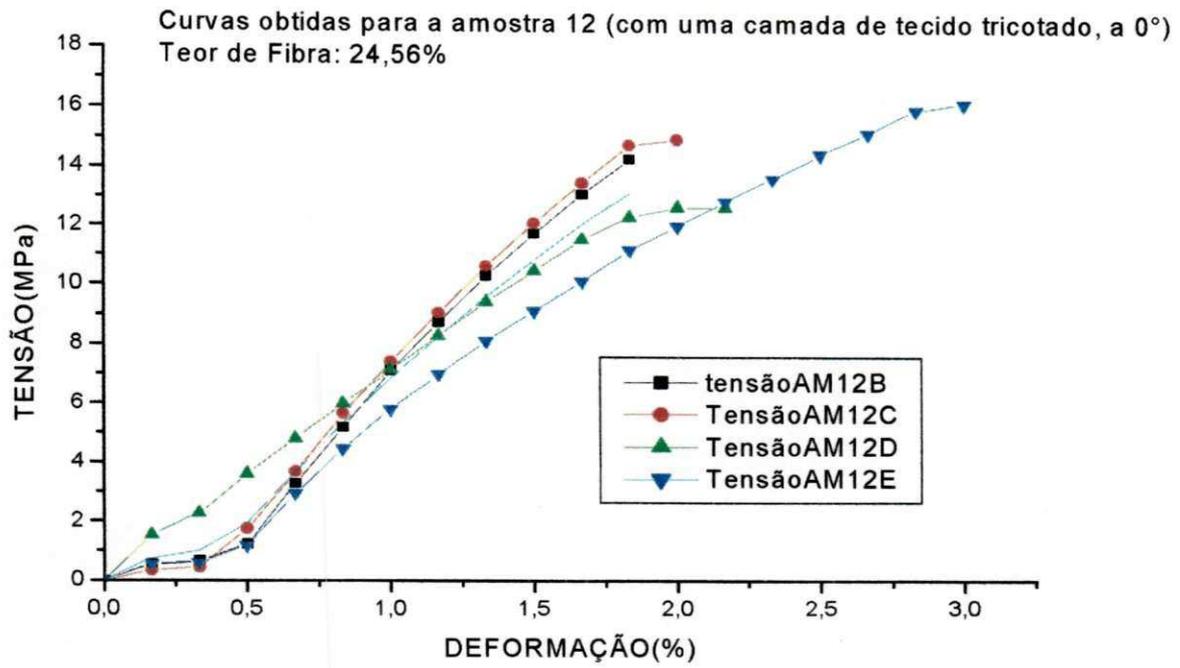
- SHAH, A. N. & LAKKAD, S. C., Mechanical Properties of Jute-Reinforced Plastics, *Fibre Science and Thecnology*, 15, 41-46, 1981.
- SEMSARZADEH, M. A. & AMIRI, D.: Bonders for Jute-Reinforced Unsaturated Polyester Resin, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 25, 1985.
- SHIRINDAR, M. K. et al.: Mechanical Properties of Jute-Polyester Composites, *Indian Journal of Technology*, Vol. 22, (1984).
- SOUSA, G. E. H.: Propriedades de Compósitos Poliéster/Juta Pultrusados, Relatório de Iniciação Científica, UFPb/CCT/DEMa, Campina Grande, 1998.
- TAN, P.; TONG, L. & STEVEN, G. P., Modelling for Predicting the Mechanical Properties of Textile Composites – A Review, *Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28A, 903 – 922, 2000.
- TOLEDO FILHO, R. D., Reforços Naturais – Estrutura e Propriedades Mecânicas, Curso de Pós-Graduação, PUC – Rio de Janeiro, 1993.
- VARMA, D. S., VARMA, M & VARMA I. K.: *Textiles Res. Journal*, Vol. 54, 1984.
- VARMA, I. K, ANANTHAKRISHNAN,S.R. & KRISHNAMOOTHY, S.: *Composites*, Vol. 20, 1993.
- WU, W. L., KOTAKI, M., FUJITA, A., HAMADA, H, INDA, M., MAEKAWA, Z. I., Mechanical Properties and Warp-Knitted, Fabric-Reinforced Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1993,12, 1096-1110.

ANEXOS

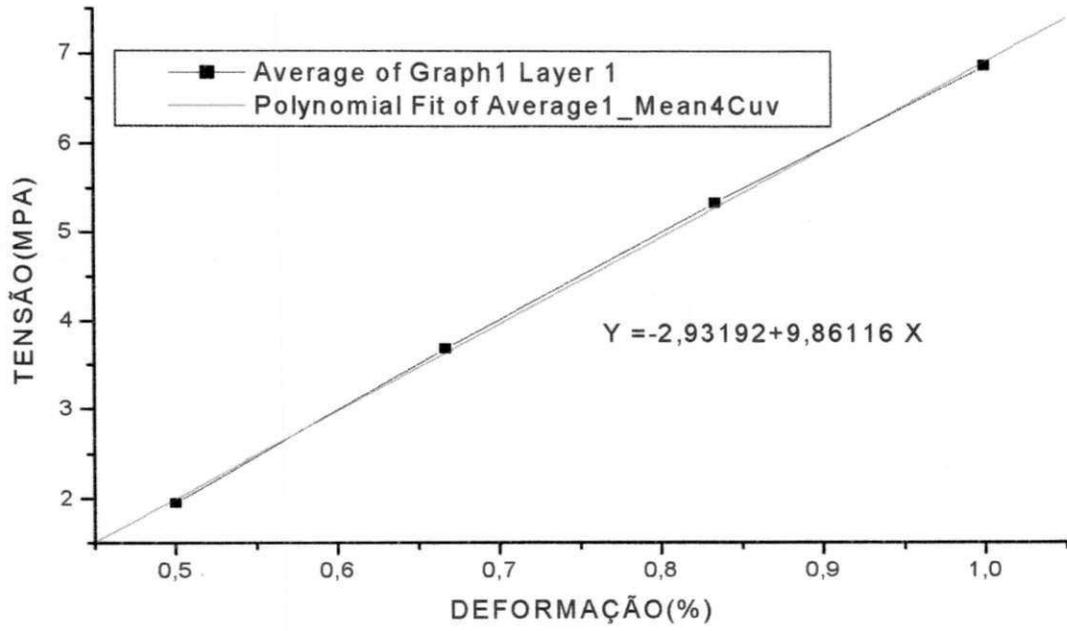
ANEXO 1

Exemplo de Cálculo do Módulo Elástico

1. Com os dados obtidos no ensaio de tração, carga (Kgf) e alongamento (mm), são plotados os gráficos de tensão versus deformação;
2. Faz-se a média dos gráficos, utilizando o programa Origin, para isto;
3. Com uma única curva, escolhe-se os pontos q estejam mais alinhados;
4. Encontra-se a equação da reta que mais se aproxima destes pontos, sendo o módulo elástico a inclinação do gráfico.



Ajuste para se encontrar o módulo elástico



ANEXO II

Exemplo de cálculo para os componentes da matriz *compliance*

1. Através da deformação encontra-se a tensão equivalente, com isso pode-se calcular S_{11} e S_{12} , estipulando-se o valor do coeficiente de Poisson, assim, tem-se:

cálculo para o coeficiente de poisson

para um coeficiente de 0,32, tem-se

$$\nu := 0.32$$

$$\varepsilon_1 := 0.7 \quad \sigma_1 := 10.8843$$

$$\varepsilon_2 := \varepsilon_1 \cdot \nu$$

$$\varepsilon_2 = 0.224$$

$$S_1 := \frac{\varepsilon_1}{\sigma_1}$$

$$S_2 := \frac{\varepsilon_2}{\sigma_1}$$

$$S_1 = 0.0643$$

$$S_2 = 0.0206$$

$$\sigma_2 := 9.8985$$

$$S_{451} := \frac{\varepsilon_1}{\sigma_2}$$

$$S_{452} := \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2}$$

$$S_{451} = 0.0707$$

$$S_{452} = 0.0226$$

onde: $S_1 = S_{11}$, $S_2 = S_{12}$, $S_{451} = S_{11}^{(45^\circ)}$ e $S_{452} = S_{12}^{(45^\circ)}$, valores para 45° . O mesmo procedimento foi utilizado para 0° .

2. Com os dados obtidos no item 1, para 0 e 45°, aplica-se na matriz *compliance*, encontrando-se os valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} , equivalendo a f, h, i e j. Estes valores são então aplicados nas equações desenvolvidas por Gommers em função dos ângulos, neste caso 30, 60 e 90°, respectivamente:

$$a := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.25 & 0.25 & 0.5 & -0.25 \end{pmatrix}$$

$$b := \begin{pmatrix} 0.0643 \\ 0.0707 \\ 0.0174 \\ 0.0191 \end{pmatrix}$$

$$x := a^{-1} \cdot b$$

$$x = \begin{pmatrix} 0.0643 \\ 0.0892 \\ 0.0174 \\ 0.1119 \end{pmatrix}$$

$$f := x_0$$

$$h := x_1$$

$$i := x_2$$

$$j := x_3$$

$$\text{angulo} := \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{angulsen} := \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$S130 := \text{angulo}^4 \cdot f + \text{angulsen}^4 \cdot h + 2 \cdot \text{angulo}^2 \cdot \text{angulsen}^2 \cdot i + \text{angulo}^2 \cdot \text{angulsen}^2 \cdot j$$

$$S130 = 0.06925$$

$$\text{angu} := \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

$$\text{angusen} := \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

$$S160 := \text{angu}^4 \cdot f + \text{angusen}^4 \cdot h + 2 \cdot \text{angu}^2 \cdot \text{angusen}^2 \cdot i + \text{angu}^2 \cdot \text{angusen}^2 \cdot j$$

$$S160 = 0.0817$$

$$\text{ang} := \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\text{angs} := \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$S190 := \text{ang}^4 \cdot f + \text{angs}^4 \cdot h + 2 \cdot \text{ang}^2 \cdot \text{angs}^2 \cdot i + \text{ang}^2 \cdot \text{angs}^2 \cdot j$$

$$S190 = 0.0892$$

3. Quando os valores calculados para 30, 60 e 90°, coincidiram com os valores experimentais, então, considerou-se como verdadeiros os valores para o coeficiente de Poisson e os valores de S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{ss} , com os quais se calcula os valores de E_{xx} , E_{yy} , E_{xy} e G .