

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIESTER/JUTA:
EFEITOS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS, ENVELHECIMENTO
TÉRMICO E ABSORÇÃO DE ÁGUA**

WILMA SALES CAVALCANTI

CAMPINA GRANDE-PARAÍBA
DEZEMBRO-2000

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIESTER/JUTA:
EFEITOS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS, ENVELHECIMENTO
TÉRMICO E ABSORÇÃO DE ÁGUA**

Wilma Sales Cavalcanti

Dissertação Apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba, em
Cumprimento às Exigências para
obtenção do Grau de Mestre

Área de Concentração: Tecnologia de Materiais Não-Metálicos.

Orientadora: Prof^a Dr^a Laura Hecker de Carvalho

Campina Grande-Paraíba

Dezembro-2000



C376p

Cavalcanti, Wilma Sales

Propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta:
efeitos de tratamentos superficiais envelhecimento
térmico e absorção de água/ Wilma Sales Cavalcanti.-
Campina Grande: UFPB, 2000.

121p. : il

Dissertação (mestrado) UFPB/CCT/DEQ

Inclui bibliografia

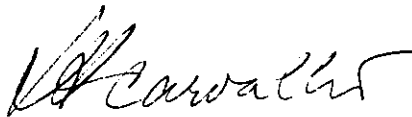
1. Polímeros compostos
 2. Compósito polimérico
 3. Fibra de juta
 4. Matriz termofixa
- I. Título

CDU: 678.7

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIESTER/JUTA:
EFEITOS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS, ENVELHECIMENTO
TÉRMICO E ABSORÇÃO DE ÁGUA**

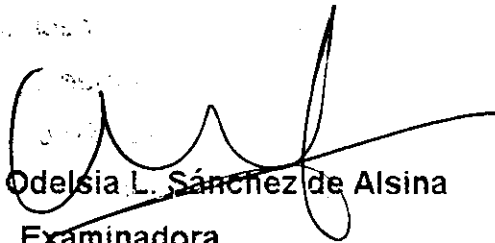
Wilma Sales Cavalcanti

Dissertação defendida e aprovada, em 20 de Dezembro de 2000, pela
banca examinadora constituída dos seguintes professores:



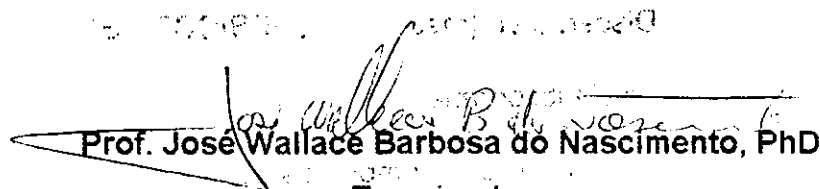
Profª. Laura Hecker de Carvalho, Ph.D

Orientadora



Profª. Drª. Sc. Odelsia L. Sánchez de Alsina

Examinadora



Prof. José Wallace Barbosa do Nascimento, PhD

Examinadora

Campina Grande-Paraíba

Dezembro-2000

DEDICATÓRIA

Em memória do meu pai Wilson Cavalcanti de Albuquerque.
Ao meu filho Igor, que meu esforço e dedicação lhe sirva de
estímulo para o seu futuro.

AGRADECIMENTOS

- À DEUS por me proteger e me guiar sempre.
- À prof^a Dr^a. Laura Hecker de Carvalho: pela orientação, revisão, sugestão e discussões durante a realização do trabalho.
- À prof^a Dr^a Odelsia L. Sánchez de Alsina, pela contribuição, compreensão e dedicação prestada.
- À prof^a Dr^a Maria Cláudia Silva (em memória), pela grande contribuição, dedicação e amizade.
- À minha mãe Marina, meu filho Igor e minha irmã Rosana pela compreensão, colaboração durante este período.
- Aos meus colegas de mestrado: Aílto, Cristiane, Drailton, Elba, Florenço, Francinaldo, Guilhermino, Izolda, Joelma, Joselito, Luciana, Múcio, Sharline, Suelândia, Tânia, Zora, em fim a todos os colegas que convivi durante este período, muitíssimo obrigada pelo apoio, incentivo e amizade.
- Aos professores do Departamento de Engenharia Química e de Engenharia de Materiais, pela amizade e apoio.
- À coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química, na pessoa do professor Luiz Gonzaga Sales Vasconcelos.
- Às secretárias da coordenação de Pós-Graduação Maria José e Maricé pela atenção e amizade.
- Aos colegas do laboratório pela amizade e cooperação.
- A todos os que contribuíram direta e indiretamente para a realização desta pesquisa.
- À CAPES pelo financiamento desta pesquisa.

SUMÁRIO

SÍMBOLOGIA	i
LISTA DE FIGURA	ii
LISTAS DE TABELAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	Vii
CAPÍTULO I	1
1.0 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	3
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL	3
2.1 Introdução	3
2.2 Compósitos	3
2.2.1 Tipos de compósitos.....	4
2.3 Principais Tipos de Reforço	5
2.4 Matriz Polimérica	7
2.5 Resina Poliéster	8
2.5.1 Estrutura do Poliéster Insaturado.....	9
2.5.2 Poliéster Ortoftálico.....	9
2.5.3 Propriedades básicas e aplicações da resina poliéster.....	10
2.5.4 Processo de cura de resina poliéster.....	11
2.5.5 Características de cura.....	11
2.6 Interface Matriz-Fibra	13
2.6.1 Características da Interface Matriz-Reforço.....	13
2.7 Método de Modificação Superficial de Fibras Vegetais	15
2.7.1 Métodos Físicos.....	15
2.7.2 Métodos Químicos.....	16
2.7.2.1 Mudança da tensão superficial.....	17
2.7.2.2 Impregnação das fibras.....	17

2.7.2.3 Acoplamento das Fibras.....	17
2.8 Processos de Fabricação de Compósitos.....	18
2.8.1 Hand Lay-up (Processo Manual).....	19
2.8.2 Spray-up (Disposição à Pistola).....	19
2.8.3 Filament Winding (Enrolamento).....	19
2.8.4 Moldagem à Vácuo.....	20
2.8.5 Pressure-bag (Moldagem sob Pressão).....	20
2.8.6 Pult.rusão.....	20
2.8.7 Moldagem por Compressão.....	20
CAPÍTULO III.....	21
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA.....	21
CAPÍTULO IV.....	35
4.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 Materiais.....	35
4.1.1 Fibra de juta.....	35
4.1.2 Poliéster.....	35
4.1.3 Estireno.....	36
4.1.4 Modificadores Superficiais Utilizados.....	37
4.1.4.1 Pré-Polímero Isocianato.....	38
4.1.4.2 Polioliol.....	38
4.1.4.3 Uretano.....	39
4.1.4.4 Desmoldante.....	39
4.2 Metodologia.....	40
4.2.1 Tratamento dos Tecidos de juta com Isocianato e Poliuretano.....	40
4.2.2 Preparação dos Laminados com Tecidos Brutos e tratados Pré-Secos ou não.....	41
4.2.3 Teor de Fibras.....	41
4.2.4 Confeção dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração	42
4.2.5 Envelhecimento dos Corpos de Prova.....	43
4.2.6 Ensaios Mecânicos.....	43

4.2.7 Absorção de Água.....	43
CAPÍTULO V.....	44
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1 Propriedades em tração.....	44
5.1.1 Efeito do teor de fibras no comportamento mecânico dos compósitos.....	44
5.1.2 Efeito do tratamento superficial dos tecidos no comportamento mecânico dos compósitos.....	47
5.1.3 Efeito da pré-secagem nas propriedades dos compósitos.....	49
5.2. Envelhecimento Térmico.....	53
5.2.1 Efeito do envelhecimento térmico no comportamento mecânico dos compósitos.....	53
5.2.2 Efeito dos tratamentos superficiais no comportamento mecânico de compósitos envelhecidos termicamente.....	56
5.2.3 Efeito da pré-secagem nas propriedades mecânicas dos compósitos envelhecidos termicamente.....	59
5.2.4 Efeito dos tratamentos superficiais e da pré-secagem nas propriedades mecânicas de compósitos envelhecidos termicamente.....	62
5.3 Absorção de Água.....	66
5.3.1 Absorção de Água em Compósitos Poliéster/Tecido de Juta.....	66
5.3.2 Efeito do Tratamento Superficial dos Tecidos na Absorção de Água dos Compósitos.....	67
5.3.3 Efeito da Pré-Secagem dos Tecidos na Absorção de Água dos Compósitos.....	68
5.3.4 Efeito Combinado da Pré-Secagem e Tratamento Superficial dos Tecidos na Absorção de Água dos Compósitos.....	69

CAPÍTULO VI	76
6.0 CONCLUSÕES	76
CAPÍTULO VII	78
7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	78
CAPÍTULO VIII	79
8.0 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	79
ANEXO A	88
ANEXO B	94
ANEXO C	103

SIMBOLOGIA

ASTM	American Standards for Testing and Materials
C_A	Concentração
D	Coefficiente de Difusão
FNV	Fibras Naturais Vegetais
GPa	Giga Pascal
MDI	Diisocianato de Difenilmetano
MEK	Metil Etil Cetona
mm	milímetro
MPa	Mega Pascal
M_t	Absorção no tempo t
M_∞	Absorção no tempo infinito
S	Desvio Padrão
TDI	Diisocianato Tolileno
TJST/SS	Tecido de juta sem tratamento e sem pré-secagem
TJST/CS	Tecido de juta sem tratamento e com pré-secagem em estufa 90°C/24h
TJTU/SS	Tecido de juta tratado com uretano e sem pré-secagem
TJTU/CS	Tecido de juta tratado com uretano e com pré-secagem em estufa 90°C/24h
TJTI/SS	Tecido de juta tratado com isocianato e sem pré-secagem
TJTI/CS	Tecido de juta tratada com isocianato e com pré-secagem em estufa 90°C/24h
x	eixo

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura química do ácido ortoftálico.....	9
Figura 2.2	Estrutura química da resina poliéster.....	10
Figura 4.1	Ilustração esquemática dos corpos de prova confeccionado segundo a norma ASTM D-3039.....	42
Figura 5.1	Resistência à Tração x Teor de Reforço para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	46
Figura 5.2	Módulo Young x Teor de Reforço para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão	47
Figura 5.3	Deformação x Teor de Reforço para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	48
Figura 5.4	Resistência à Tração x Teor de Reforço dos compósitos com tecidos de juta brutos e tratados com uretano e isocianato.....	50
Figura 5.5	Módulo Young x Teor de Reforço dos compósitos com tecidos de juta brutos e tratados com uretano e isocianato.....	51
Figura 5.6	Deformação x Teor de Reforço dos compósitos com tecidos de juta brutos e tratados com uretano e isocianato.....	52
Figura 5.7	Resistência à Tração x Teor de Reforço dos compósitos/poliéster de juta brutos e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem e moldados por compressão.....	54
Figura 5.8	Módulo Young x Teor de Reforço para compósitos poliéster/tecido de juta bruto e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem e moldados por compressão.....	55
Figura 5.9	Deformação x Teor de Reforço para compósitos poliéster/tecido de juta bruto e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem e moldados por compressão.....	56
Figura 5.10	Efeito do tempo de exposição térmica na resistência à tração da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.....	58
Figura 5.11	Efeito do tempo de exposição térmica no módulo young da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	59

Figura.5.12	Deformação x tempo de exposição para compósitos poliéster tecido de juta moldado por compressão e para resina poliéster puro.....	60
Figura 5.13	Efeito do tratamento superficial do reforço e do tempo de exposição térmica na resistência à tração de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.....	62
Figura 5.14	Efeito do tratamento superficial do reforço e do tempo de exposição térmica no módulo young de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.....	63
Figura 5.15	Efeito do tratamento superficial do reforço e do tempo de exposição térmica na deformação na ruptura de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.....	64
Figura 5.16	Efeito da pré-secagem do reforço e do tempo de exposição na resistência à tração da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.....	65
Figura 5.17	Efeito da pré-secagem do reforço e do tempo de exposição no módulo young da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.....	66
Figura 5.18	Efeito da pré-secagem do reforço e do tempo de exposição na deformação na ruptura da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.....	67
Figura 5.19	Efeito combinado da pré-secagem e do tratamento superficial na resistência à tração de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão e envelhecidos	68
Figura 5.20	Efeito combinado da pré-secagem e do tratamento superficial no módulo young de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão e envelhecidos.....	69
Figura 5.21	Efeito combinado da pré-secagem e do tratamento superficial na deformação na ruptura de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão e envelhecidos.....	70
Figura 5.22	Propriedades Mecânicas x Tempo de Exposição para poliéster e compósitos com 2 e 4 camadas de tecidos de juta brutos e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem moldados por compressão.....	71
Figura 5.23	Curvas de cinética de sorção de água da matriz poliéster e dos compósitos poliéster/juta reforçados por tecidos brutos.....	73
Figura 5.24	Efeito do tratamento superficial dos tecidos na cinética de sorção de água de compósitos poliéster/juta.....	75

Figura 5.25	Efeito da pré-secagem dos tecidos na cinética de sorção de água de compósitos poliéster/juta.....	76
Figura 5.26	Efeito da ação combinada de tratamento superficial e pré-secagem do reforço na cinética de sorção de água de compósitos poliéster/juta.....	77
Figura 5.27	Efeito do teor de fibras, tratamento superficiais e pré-secagem do reforço na absorção de água no equilíbrio de compósitos poliéster/juta.....	78
Figura 5.28	Curvas de cinética de absorção de água com ajuste do modelo para compósitos poliéster/juta em função do teor de fibras, tratamento superficial e pré-secagem do reforço.....	80
Figura 5.29	Coeficiente de difusão em função do teor de fibras. Solução assintótica para tempos curtos.....	80
Figura 5.30	Coeficiente de difusão em função do teor de fibras. Solução assintótica para tempos longos.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Características e Propriedades da Fibra de Juta.....	23
Tabela 4.1	Propriedades da Resina Poliéster.....	36
Tabela A.1	Resistência à Tração de Compósitos Poliéster/Tecido de.....	Anexo A
Tabela A.2	Módulo Young de Compósitos Poliéster/Tecido de Juta...../.....	Anexo A
Tabela A.3	Deformação de Compósitos Poliéster/Tecido de Juta.....	Anexo A
Tabela A.4	Teor de fibras dos compósitos poliéster/tecido de juta.....	Anexo A
Tabela B.1	Resistência à Tração dos Compósitos Poliéster /Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C.....	Anexo B
Tabela B.2	Módulo Young dos Compósitos Poliéster /Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C.....	Anexo B
Tabela B.3	Deformação dos Compósitos Poliéster /Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C.....	Anexo B
Tabela B.4	Resistência à Tração Relativa de Compósitos Poliéster/Tecido de Juta.....	Anexo B
Tabela B.5	Módulo Young Relativa de Compósitos Poliéster/Tecido de Juta.....	Anexo B
Tabela B.6	Deformação Relativa de Compósitos Poliéster/Tecido de Juta.....	Anexo B
Tabela B.7	Resistência à Tração Relativa dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecidos em Estufa – Efeito da Pré-Secagem.....	Anexo B
Tabela B.8	Módulo Young Relativa dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecidos em Estufa – Efeito da Pré-Secagem.....	Anexo B
Tabela B.9	Deformação Relativa dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecidos em Estufa – Efeito da Pré-Secagem.....	Anexo B
Tabela C.1	Coefficiente de Difusão de Água em Compósito Poliéster/Tecido de Juta - Para Tempos Curtos.....	Anexo C
Tabela C.2	Coefficiente de Difusão de Água em Compósito Poliéster/Tecido de Juta - Para Tempos Longos.....	Anexo C

RESUMO

Neste trabalho, as propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçados por tecidos de juta, foram avaliadas em função do teor de fibras, tempo de exposição térmica, da secagem prévia do reforço e de tratamentos superficiais nas fibras. A absorção de água destes compósitos em função destes parâmetros também foi avaliada. Os resultados obtidos mostram que as propriedades mecânicas dos compósitos dependem do teor de fibras. Aumentos de 20% na resistência à tração e 108% no módulo chegaram a ser alcançados em compósitos reforçados por 4 camadas de tecido (50% em peso de fibras). O alongamento na ruptura, mesmo sem ter apresentado variação significativa, tendeu a aumentar levemente com o teor de fibras. A secagem prévia do reforço elevou as propriedades mecânicas de todos os compósitos investigados. Dentre os dois tratamentos superficiais empregados, o tratamento com o pré-polímero isociano foi o que se mostrou mais eficiente, contudo, estes aumentos não foram significativos. Melhores propriedades mecânicas foram exibidas por compósitos reforçados por tecidos tratados e submetidos à pré-secagem. Todos os compósitos investigados, quando expostos termicamente em estufa, independente do reforço ter sido previamente seco e/ou tratado ou não, tiveram comportamentos similares, ou seja: a) a resistência à tração decresceu nos 10 primeiros dias de exposição e se manteve para tempos mais longos, b) o módulo se manteve constante ou tendeu a aumentar em tempos mais longos e c) o alongamento na ruptura diminuiu com o tempo de envelhecimento térmico. A absorção de água foi maior para os compósitos reforçados por tecidos brutos do que para os reforçados por tecidos previamente secos. Os menores coeficientes de difusão efetiva e, portanto, a menor taxa de sorção de água foi obtida para compósitos tratados com isocianato e previamente secos. A cinética de sorção foi adequadamente descrita por um modelo difusional e, em todos os casos, os coeficientes de correlação foram superiores a 0,99.

ABSTRACT

This work deals with the mechanical properties of polyester matrix composites reinforced by hessian cloths as a function of fiber content, thermal exposure time, fiber drying previous to composite lamination and fiber surface treatment. The water adsorption of these composites as a function of the above parameters was also evaluated. The results show that the composites mechanical properties depend on fiber content. Increases of up to 20% in tensile strength and 108% in modulus were obtained for composites reinforced by 4 plies of hessian cloths (50% w/w of jute). The elongation at break, albeit not varying significantly, tended to slightly increase with fiber content. Drying of the cloths prior to lamination significantly increased the strength and modulus of all composites investigated. The isocyanate pre-polymer surface treatment was the most effective among the two treatments employed on the hessian cloths, however, the increases obtained for the composite's performance were not significant. Best mechanical properties were obtained by composites reinforced with surface treated cloths dried just before lamination. All composites under investigation, despite their reinforcement having been surface treated and/or previously dried or not, exhibited the same behavior during thermal exposure, i.e.: a) tensile strength decreased within the first 10 days of exposure and leveled off at longer times; b) the modulus was not affected or tended to increase with thermal aging and c) elongation at break decreased with thermal exposure. The composites reinforced by pre-dried hessian cloths absorbed less water than those reinforced by non-dried cloths. The lowest effective diffusion coefficients, and therefore, the lowest water sorption rate was obtained for composites reinforced by isocyanate modified, pre-dried cloths. Sorption kinetics was adequately described by a diffusional model and, in all cases, correlation coefficients better than 0.99 were obtained.

CAPÍTULO I

1.0 INTRODUÇÃO

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

No passado, as fibras vegetais eram empregadas na fabricação de cordas, fios, carpetes, e outros produtos decorativos. Porém com o avanço no desenvolvimentos das fibras sintéticas, houve um decréscimo no consumo destas fibras. Atualmente com a diminuição rápida das reservas de petróleo, consciência crescente de preservação do meio ambiente, e controle de poluição, tem-se dado grande importância à utilização de recursos renováveis na fabricação de diversos produtos (GHOSH P,1997).

As fibras naturais vegetais não só são importantes no desenvolvimento econômico dos países sub-desenvolvido e em desenvolvimento, como também são recursos naturais renováveis e biodegradáveis, leves, fortes, duráveis, de fácil secagem, baixo custo e apresentam um bom conjunto de propriedades mecânicas, adequadas à várias aplicações.

Um dos principais obstáculos no uso de fibras vegetais em compósitos poliméricos está associado à baixa temperatura de processamento permitida devido à possível degradação da fibra lignocelulósica e/ou à possibilidade de emissões de voláteis que poderiam afetar as propriedades dos compósitos. A temperatura de processamento é portanto, limitada a aproximadamente 200^oC, embora seja possível usar altas temperaturas por períodos curtos. Isto limita o tipo de termoplástico que pode ser usado como matrizes em compósitos reforçados por fibras vegetais. As matrizes termoplásticas mais utilizadas são: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poli Cloreto de Vinila (PVC) e Poliestireno (PS).

A alta absorção de umidade das fibras vegetais é um outro obstáculo considerável. Absorção de umidade pode resultar em inchamento das fibras e o interesse na estabilidade dimensional dos reforços em compósitos não pode ser ignorado. No compósito a absorção de umidade é minimizada devido ao

recobrimento das fibras pelo polímero. A absorção de umidade das fibras podem ser reduzida através de modificações químicas de alguns de seus grupos hidroxila mas isto implica em acréscimo no custo das fibras. Uma boa adesão fibra/matriz também pode diminuir a razão e quantidade de água absorvida pelo compósito (ROWELL et al. 1996).

Outras dificuldades associadas com o uso das fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos estão relacionadas ao seu baixo módulo elasticidade, ao fato de apresentarem propriedades mecânicas inferiores às das fibras sintéticas, terem baixa resistência biológica e serem susceptíveis a degradação em meios alcalinos e ácidos. Além disto, as propriedades mecânicas das fibras vegetais são dependentes da idade da planta, tipo de solo, condições climáticas, do local e as condições de processamentos empregadas bem como de sua estrutura e composição química (CARVALHO, L. H., 1996; GOWDA, et al. 1999).

Apesar destas dificuldades, as fibras vegetais podem ser utilizadas como reforço em polímeros gerando produtos úteis, ecologicamente amigáveis, com propriedades mecânicas adequadas a várias aplicações e com vantagens energéticas e econômicas. sobre os produtos reforçados por fibras sintéticas. A utilização destes produtos, no entanto, depende da natureza de suas propriedades durante o uso. Assim sendo, no presente trabalho investigou-se o efeito do envelhecimento térmico, absorção de água e modificação superficiais das fibras nas propriedades de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.

CAPÍTULO II

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

2.1 Introdução

Muitos são os materiais que podem ser utilizados como matriz ou reforço em compósitos. A evolução tecnológica de processos tem permitido o emprego de plásticos reforçados em substituição a materiais convencionais com vantagens econômicas e de produtividade, além de permitir o desenvolvimento de novos produtos, com propriedades específicas a uma determinada aplicação.

Em se tratando de reforço, as fibras de vidro foram as precursoras das aplicações, inovações e melhorias tecnológicas no desenvolvimento de compósitos poliméricos. Com o tempo, foram surgindo outras fibras sintéticas com perspectivas de substituir com vantagens as fibras de vidro. Entre elas destacam-se as de carbono, kevlar e boro (BLASS, 1988), porém estas fibras são bem mais caras que as de vidro e, por isto, sua utilização restringe-se praticamente a aplicações aeroespaciais e desportivas onde seu alto custo é justificado pelo desempenho.

Uma outra classe de reforços fibrosos que tem despertado grande interesse e tem sido atualmente investigada é a de fibras naturais. Isto porque estas fibras além de exibirem boas propriedades mecânicas, são baratas, leves, abundantes, facilmente disponíveis e provêm de fontes renováveis. Estas características permitem sua utilização como elemento de reforço em matrizes poliméricas numa variada gama de aplicações.

2.2 Compósitos

Um compósito consiste na combinação física de dois ou mais materiais com características individuais distintas. Um é a fase contínua, também chamada matriz, e a outra, é a fase descontínua ou reforço. Em compósitos, as cargas ou

reforços são embebidos na matriz e cada constituinte permanece com as suas características individuais (FLINN, 1981).

As propriedades dos compósitos são principalmente controladas pelas propriedades de seus materiais constituintes, teor, distribuição e geometria do reforço. Estas propriedades controlam a homogeneidade do produto. As características de anisotropia de um compósito são influenciadas enormemente pela orientação do reforço. As propriedades finais dos compósitos dependem fundamentalmente da forma como os componentes individuais interagem entre si, ou seja, dependem da interface entre as fases descontínua e contínua.

A grande vantagem dos materiais compósitos é a de que eles aliam as melhores qualidades de seus constituintes. O sucesso dos materiais compósitos reside na habilidade de se fazer uso das seguintes características:

Baixa massa, alta resistência, alta rigidez, grande resistência à fadiga, possibilidade de escolha da orientação da fibra, versatilidade de projeto, larga variedade de combinações de fibras e de matrizes, grande resistência à corrosão, estabilidade dimensional, baixa transmissão de ruídos, vida longa e pequena quantidade de energia requerida para o processo

Obviamente nem todas as vantagens acima podem ser exploradas ao mesmo tempo e, geralmente, não há essa necessidade(Hazin et al.)

2.2.1 Tipos de Compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com a composição química dos constituintes e com geometria ou forma das fases presentes. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica. Componentes na forma de fibras, (longas ou curtas), partículas globulares, plaquetárias ou escamas, podem ser incorporadas a matrizes dúcteis ou frágeis de maneira aleatória ou em laminados orientados, gerando compósitos com diferentes estruturas e propriedades.

Os materiais têm sido convencionalmente classificados de acordo com a sua natureza química e física em: cerâmicos, metálicos e poliméricos.

Os materiais cerâmicos são inorgânicos e têm como características principais a elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade; os materiais metálicos apresentam como características gerais a excelente ductilidade e excelentes condutividade térmica e elétrica. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua elevada densidade. Os materiais poliméricos destacam-se pela sua baixa densidade e fácil conformação e resistividade elétrica. Sua estrutura é constituída de macromoléculas formadas a partir de ligações covalentes e coesas entre si por fracas interações intermoleculares.

O componente de reforço no compósito pode estar na forma particulada, na forma de laminados ou de fibras. O maior volume de aplicação de reforço envolve fibras, filamentos ou monofilamentos. O aspecto unidirecional da fibra permite a fabricação da estrutura do compósito, através das facilidades têxteis que as fibras podem ser obtidas, como: tecidos, não-tecidos (nonwoven), mechas, fios e outros.

A combinação de propriedades físicas, mecânicas e químicas dos componentes de um compósito para proporcionar as características desejadas ao produto final deve ser realizada conhecendo-se a fundo as propriedades de cada componente. Uma propriedade física dos materiais que afeta diretamente a estrutura dos compósitos é o coeficiente de expansão térmica. Uma discrepância muito acentuada entre os componentes do compósito dificulta a adesão entre os componentes, pois a dilatação ou a contração diferencial favorece a separação das fases na região interfacial. Quanto mais fraca for a interação atômica ou molecular na estrutura do material maior será o coeficiente de expansão térmica (HAGE, 1989).

2.3 Principais Tipos de Reforço

São denominados reforços aqueles constituintes que, de uma maneira ou de outra, aumentam determinadas propriedades do compósito em relação à matriz polimérica. Podem ser considerados reforços desde simples cargas minerais, muitas vezes incorporadas aos polímeros com o intuito de reduzir custos, até fibras de ultra alta resistência.

As cargas minerais proporcionam aumentos na rigidez, dureza e, algumas vezes, na resistência e temperatura de distorção térmica; os elastômeros

proporcionam aumento na resistência ao impacto de matrizes poliméricas frágeis; as fibras, pelas suas características unidirecionais, incrementam acentuadamente a maior parte das propriedades mecânicas na direção longitudinal ao reforço.

Os reforços podem ser classificados de acordo com a sua natureza e as suas características geométricas.

Quanto à sua natureza, os reforços podem ser:

- extremamente duros para promover aumento à dureza e a resistência a brasão;
- resistentes à ruptura para proporcionar elevada resistência à tração, à flexão e ao cisalhamento;
- rígidos para incrementar o módulo elásticos;
- extremamente flexíveis para aumentar a resistência ao impacto;
- extremamente resistentes termicamente para aumentar a estabilidade térmica.

Quanto às características geométricas, os reforços podem ser :

- Particulados
- Fibrosos
- Laminados.

As características do reforço que tem maior influência sobre as propriedades de compósitos são: a sua constituição química, tamanho e razão de aspecto. A adesão entre os componentes de um compósito é de fundamental importância para que o reforço possa exercer sua função de forma efetiva e os esforços aplicados, divididos entre as duas fases (RICHARDSON, 1977).

A concentração do reforço é uma das principais variáveis a ser considerada no desenvolvimento do compósito. A qualidade do compósito final é função, dentre outros requisitos, do comprimento e distribuição das fibras, do grau de dispersão destas na matriz polimérica e do grau de cristalinidade do compósito. No caso de compósitos reforçados por fibras longas ou contínuas, a qualidade do produto final também depende do método e condições de moldagem dos componentes.

Quando se utilizam cargas fibrosas, as tensões aplicadas ao sistema são transferidas pelo polímero à fibra por um mecanismo de transferência de tensão

por cisalhamento (BRYDSON, 1982). Para que haja transferência efetiva de tensões é necessário que a interface seja forte, ou seja, que haja boa adesão entre os componentes.

Fibras como reforço em plásticos são usados sempre que há a necessidade de propriedades mecânicas elevadas combinadas com baixo peso. No que diz respeito ao uso de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos, o interesse maior é a substituição parcial ou total das fibras de vidro, extensamente usadas, além da obtenção de vantagens do ponto de vista de peso, custo e adesão fibra-matriz, especificamente com materiais de matriz polar (WOLLERDORFER et al., 1998).

2.4 Matriz Polimérica

A matriz, além de ser responsável pelo aspecto externo do compósito e de proteger o reforço contra ataques químicos e físicos tem como principal função de dispersar ou aglomerar o reforço, e, quando submetida a uma tensão deve ser capaz de distribuir e transferir as tensões para o componente do 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.

As matrizes poliméricas podem ser constituídas de termofixos, termoplásticos e elastômeros. Na atualidade os compósitos são fabricados utilizando maior ou menor proporção estes três tipos de matrizes. Para os compósitos avançados a maior parte das matrizes poliméricas são a base de resinas termofixas, destacando-se as resinas épxi, fenólicas e poliéster.

As resinas épxi, em que pese apresentarem excelentes propriedades mecânicas, são penalizadas por custos elevados e baixa resistência à intempéries. O processo de cura destas resinas é bem mais complexo do que o da resina poliéster. No caso das resinas fenólicas, sua principal desvantagem perante as resinas poliéster e épxi é que durante a sua cura corre a evolução de água como subproduto. Portanto sua aplicação em compósitos é mais complexa, pois a retirada da umidade passa a ser um importante fator durante o processo de fabricação. As resinas poliéster são usadas em compósitos de uso geral, baixo

custo e não tão sofisticados. Depois de curadas, apresentam boas propriedades elétricas e oferecem boa resistência à corrosão e ataques químicos. Por outro lado a resina pura é relativamente fraca e quebradiça. A cura da resina de poliéster é um processo exotérmico e exige um sistema de cura a base peróxido orgânico como catalisador.

As matrizes poliméricas termoplásticas embora reduzam enormemente 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.

As matrizes elastoméricas são muito importantes na fabricação em sistemas compósitos resistentes ao impacto.

2.5 Resina Poliéster

Os poliésteres são resinas que possuem grupos éster como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares. Resultam da reação de condensação de um diol com um diácido, e dependendo do tipo do ácido empregado, o poliéster pode ser saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo).

O poliéster saturado é obtido pela reação entre um diol e um diácido saturado, resultando num produto termoplástico, cuja cadeia molecular é composta apenas por ligações simples entre átomos de carbono. Têm moléculas longas e lineares, e não são sujeitos a reações de reticulação, podendo ser encontrados em forma de fibras ou filmes. As resinas são obtidas a partir do ácido ortoftálico, podendo apresentar-se como termoplásticos ou termofixos.

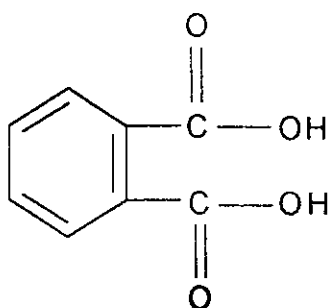
Os poliésteres insaturados são obtidos a partir de diácidos insaturados, um diácido saturado e um diol, resultando num produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluído num monômero vinílico, inibido, para facilitar sua estocagem e posterior utilização. Inicialmente encontra-se no estado líquido e pós a adição de um agente de cura, solidifica formando uma estrutura termofixa irreversível.

2.5.1 Estrutura do Poliéster Insaturado

A estrutura de um poliéster insaturado, é composta geralmente de três componentes básicos: ácidos saturados, ácidos insaturados e glicóis. No caso de um poliéster de uso geral, estes componentes consistem de ácido ou anidrido ftálico, ácido fumárico ou anidrido maléico, propileno glicol e um monômero vinílico (comumente o estireno), respectivamente. Cada um desses componentes tem uma função básica na obtenção da resina poliéster. O ácido insaturado fornece os pontos reativos para as ligações cruzada; o ácido saturado determina o grau de espaçamento ou concentração das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia do poliéster, e o glicol, naturalmente, proporciona os meios para a esterificação e a ponte entre os ácidos para formar o polímero. O monômero vinílico dissolve o polímero formado durante a reação de esterificação e serve de ponte de ligação entre os pontos de insaturação presentes na cadeia do poliéster.

2.5.2 Poliéster Ortoftálico.

Os poliésteres denominados ortoftálicos são considerados, do ponto de vista de aplicação, como de uso geral, e são assim chamados, por terem como ácido, o ácido ortoftálico, figura 2.1.



ÁCIDO ORTOFTÁLICO

Figura 2.1. Estrutura química do ácido ortoftálico.

A resistência química de um poliéster está ligada principalmente ao índice de acidez, quantidade de grupos ésteres formados e densidade das ligações cruzadas.

Quando se produz uma resina poliéster insaturada partindo-se do ácido ortoftálico, figura 2.1 os dois radicais ácidos interferem entre si na cadeia do polímero em formação, fazendo com que essa cadeia seja mais curta. Essa interferência, ocorre com o ácido ortoftálico em razão da proximidade desses radicais ácidos na molécula do material. Além disso, uma resina com a presença de ácido é muito difícil de ser produzida com baixo índice de acidez, sem usar o artifício de adicionar um excesso de glicol no momento da reação. Esta adição excessiva de glicol prejudica a resistência química do polímero final em razão da afinidade que tem pela água.

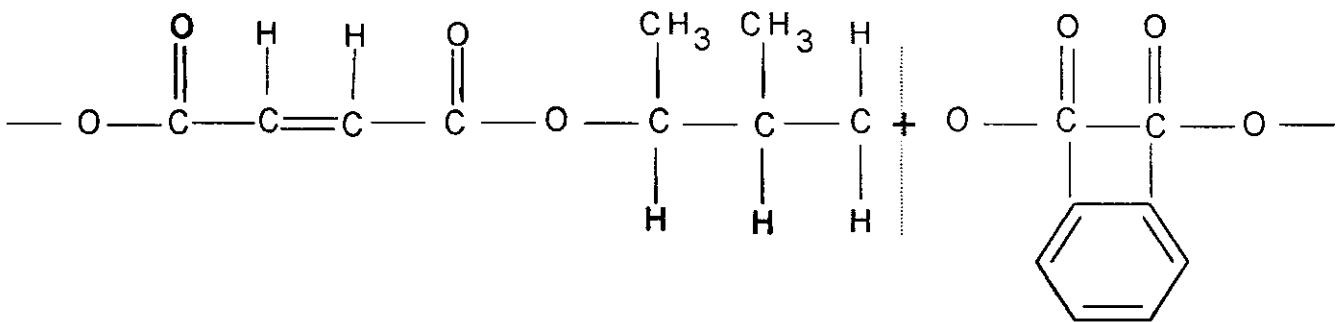


Figura 2.2. Estrutura química da resina poliéster ortoftálico.

2.5.3 Propriedades básicas e aplicações da resina poliéster

As propriedades mais importante dos poliésteres insaturados incluem facilidades de manipulação, cura rápida sem liberação de substâncias voláteis e tóxicas, cores claras, estabilidade dimensional e, geralmente, boas propriedades físicas e químicas. As principais aplicações de resinas poliéster reforçadas por fibras são: armações de barcos (remos e objetos recreativos); meios de transportes (carcaça, partes para transporte de passageiros, cabinas de

caminhões); bens de consumo (diversos artigos de bagagens, vara de pesca, cadeiras, carcaças de eletrodomésticos etc.) e materiais de construção como tubos, calhas entre outros (CARVALHO, 1998).

2.5.4 Processo de Cura de Resina Poliéster

A cura é a transformação de uma estrutura linear ou ramificada em uma estrutura tridimensional. Assim, durante a cura há a transformação da resina termoplástica que se encontra no estado líquido para uma resina termorrígida sólida.

O processo de cura por meio de sistema de iniciador/acelerador ocorre pela geração de radicais livres, resultantes da ação do acelerador sobre o iniciador, que atacam as insaturações. Os radicais livres atacam as duplas ligações das macromoléculas e dos monômeros dando início a uma reação em cadeia que produz a total reticulação da resina.

As resinas poliéster podem ser curadas a frio ou à quente. Certos peróxido são utilizados à temperatura ambiente, tais como os dissociados através do uso de promotores ou aceleradores. As quantidades dos promotores usados nas resinas são muito pequenas e, além do cobalto outros sais metálicos podem ser empregados em conjunto, como os sais de cobre, potássio, vanádio, manganês e outros. Essa complexidade de promotores em combinações variadas altera as propriedades de cura da resina, tais como o controle exotérmico, tempo de gel, de cura e outros.

A seleção de um sistema de cura é dependente de uma série de fatores a serem considerados, ou seja: tempo de gel, processo, tipo de atividade da resina, espessura da peça, temperatura da área de processo e tipo e quantidade de carga e aditivo, (CARVALHO et al., 1989).

2.5.5 Características de cura

A cura de resinas termorrígidas é muito exotérmica. Isto é crítico quando seções grossas são moldadas. Addabo et al. (1979), estudaram a cura de uma resina termorrígida num molde aquecido e mostraram a existência de espessura

crítica abaixo da qual o tempo de um ciclo não depende da espessura da peça. Willians et al., verificaram que o plano mais quente não coincide freqüentemente com a linha central, e que o tempo de cura não é necessariamente proporcional a espessura da peça moldada, como é freqüentemente afirmado. É importante selecionar a temperatura ótima para que o molde possa ser preenchido sem gelificação prematura, e desta maneira a temperatura máxima da peça permaneça abaixo de um teto no qual, acima deste, as reações de degradação podem ocorrer (WHITE & DE, 1996).

Quando o tempo de ciclo é determinado pela cura na parede, é importante superestimar a conversão crítica necessária para retirar a peça do molde. O material pode lograr dum nível crítico de conversão em que é dimensionalmente estável e pode ser removido do molde sem perder sua forma ou causar defeitos em sua superfície. Isto é freqüentemente descrito como o final de cura, contudo haverá normalmente reação de cura posterior a esse tempo (CORBAN, 1975; WHITE & DE, 1996).

Reforços absorvem parte do calor e reduzem o pico exotérmico de temperatura, melhoram a uniformidade da cura e 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 (WHITE & DE, 1996).

A dependência das propriedades de resinas termorrígidas com a composição e/ou o grau de cura não é facilmente generalizada. Propriedades típicas mudam com o pós cura do poliéster podendo levar a aumentos no módulo de até 30% e na resistência 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 (ADDABO et al., 1979; WILLIAM et al., 1985; HAGE, 1989; ISORCA, INC., 1992; WHITE & DE, 1996).

2.6 Interface Matriz-Fibra

A interface é de grande importância 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, ou seja, as tensões que atuam na matriz são transmitidas às fibras 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, 1989).

2.6.1 Características da Interface Matriz-Reforço

Em compósitos com matrizes poliméricas a falha deveria ocorrer na matriz. Na prática, a adesão nunca é perfeita e o processo de ruptura é gerado na interface. Portanto, na maioria dos casos, a falha do plástico reforçado ocorre por cisalhamento na região interfacial. A falha ocorre em função da debilidade das ligações atômicas ou intermoleculares entre a superfície da matriz e a superfície do reforço.

Um dos fatores que favorece a interação interfacial é o fenômeno de contração que a matriz polimérica sofre durante a sua cura ou a sua solidificação. Para que ocorra uma melhor distribuição de tensão sobre a superfície do reforço, durante o fenômeno de contração é necessário que ocorra um molhamento perfeito do reforço pela resina.

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. Sendo assim, quase todos os reforços em matrizes poliméricas devem sofrer um tratamento superficial para melhorar sua acoplagem à matriz.

A adesão pode ser atribuída a cinco mecanismos principais que podem ocorrer na interface isoladamente ou em combinação, ou seja:

↳ 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 constituintes envolvidos.

↳ Atração Eletrostática: Forças de atração ocorrem entre duas superfícies quando uma delas está carregada positivamente e a outra negativamente, tais como nas interações ácido-base e de ligação iônica. A resistência da ligação dependerá da intensidade das cargas.

↳ Ligação Química: O estudo das ligações químicas está relacionado com o uso de agentes de acoplamento, empregados nas fibras para produzir a ligação entre a fibra e a matriz. A ligação química é formada entre um grupo químico da superfície da fibra e um grupo químico compatível na matriz.

↳ Adesão Mecânica: A ligação pode ocorrer pelo 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 da fibra. Os aspectos geométricos não são os únicos fatores que causam adesão mecânica, já que contração da resina durante o processo de cura e expansão térmica da fibra e matriz, produzem tensões de compressão e cisalhamento na superfície.

2.7 Método de Modificação Superficial de Fibras Vegetais

A qualidade da interface fibra-matriz é significativa para a aplicação de fibras vegetais com fibras de reforço para plásticos. Métodos físicos e químicos podem ser usados para otimizar esta interface. Estes métodos de modificação possuem diferentes eficiências como promotores de adesão entre a matriz e a fibra (BLEDZKI, et al., 1996).

2.7.1 Métodos Físicos

Fibras de reforço podem ser modificadas por métodos físicos e químicos. Métodos físicos, tais como alongamento, calandragem, tratamentos térmicos e a produção de fios híbridos não modificam a composição química das fibras, porém modificam as propriedades estruturais e superficiais da fibra e deste modo influenciam a adesão mecânica fibra/matriz.

Descarga elétrica (corona, plasma frio) são diferentes métodos de tratamento físico. O tratamento corona é uma das mais interessantes técnicas para ativar a oxidação superficial. Este processo modifica a energia superficial das fibras celulósicas (BELGACEM et al., 1994).

Os mesmos efeitos são alcançados pelo tratamento de plasma a frio. Dependendo da natureza e do tipo de gases usados, uma variedade de modificações superficiais podem ser realizadas. Ligações cruzadas superficiais podem ser introduzidas, a energia superficial pode ser acrescida ou decrescida, e grupos e radicais livres reativos podem ser produzidos.

Os métodos de descarga elétrica são conhecidos por serem muito efetivos para substrato de polímeros "não ativos" como o poliestireno, polietileno e o polipropileno. Têm sido usados para a modificação de fibras celulósicas, para aumentar a viscosidade do material fundido em compósitos celulose-polietileno e melhorar as propriedades mecânicas de compósitos celulose-polipropileno, (BLEDZKI et al., 1996).

Um método antigo de modificação de fibra celulósica é a mercerização, (BLEDZKI et al., 1996), que tem sido extensamente usado em fibras de algodão. A mercerização consiste num tratamento alcalino de fibras celulósicas; onde varia-se o tipo e a concentração da solução alcalino, sua temperatura, tempo de

tratamento, etc. Atualmente, existe a tendência de usar a mercerização para fibras naturais vegetais. Ótimas condições de mercerização asseguram melhoramentos nas propriedades de tensão e características de absorção que são importantes na composição do processo.

2.7.2. Métodos Químicos

Fortemente polarizadas, as fibras celulósicas são pouco compatíveis com os polímeros hidrofóbicos. Quando dois materiais são incompatíveis, é muitas vezes possível promover a compatibilidade pela introdução de um terceiro material que têm propriedades intermediárias entre os outros dois. (FELIX e GATENHOLM, 1991), afirmaram que o desenvolvimento de uma teoria definitiva para o mecanismo de ligação de agentes de acoplamento em compósitos é um problema complexo. A principal teoria de ligações químicas não é suficiente. Além disso, a consideração de outros conceitos, que incluem a morfologia da interface, energia interfacial, e o fenômeno de molhabilidade, contudo, se faz necessária para que os resultados sejam explicados em sua totalidade. Algumas das diversas teorias sobre os mecanismo de acoplamento destes materiais, são:

- ↳ Camadas interfaciais frágeis – são eliminadas com agentes de acoplamento
- ↳ Camadas deformadas – os agentes de acoplamento produzem um camada resistente e flexível
- ↳ Camadas limitadas – agentes de acoplamento desenvolvem uma alta região interfacial de ligações cruzadas com um módulo intermediário entre o substrato e o polímero
- ↳ Molhabilidade – agentes de acoplamento melhoram o molhamento entre o polímero e o substrato (fator de tensão superficial crítica)
- ↳ Ligação química – agentes de acoplamentos formam ligações covalentes com os dois materiais

↳ Efeito ácido-base – agente de acoplamento modificam a acidez (ph) da superfície do substrato.

Algumas das pesquisas sobre o uso de métodos químicos para promover a adesão entre sistemas lignocelulosicos e matrizes poliméricas são descritos abaixo:

2.7.2.1 Mudança da tensão superficial

A energia superficial das fibras está intimamente relacionada com a natureza hidrofílica da fibra. Investigações feitas em compósitos poliéster/juta tratada com poliacetato de vinila mostraram aumento nas propriedades mecânicas (SEMSARZADEH, 1984).

2.7.2.2 Impregnação das fibras

A melhor combinação de fibra e polímeros é encontrada por impregnação do tecido reforçado com matriz polimérica compatível ao polímero. Para este propósitos soluções poliméricas ou dispersões de baixa viscosidade são usados. Para um número de interessante de polímeros, a falta de solventes limita o uso do método de impregnação (GEBNER, 1989).

2.7.2.3 Acoplamento Químico

Um importante método de modificação química é o método de acoplamento químico, este melhora a adesão interfacial. A superfície da fibra é tratada com um composto que forma uma ponte de ligações químicas entre a fibra e matriz.

↳ Copolimerização por enxertia

Um método efetivo de modificação química das fibras naturais é copolimerização por enxertia (UGBOLUE, 1990; KROSCWITZ, 1990; PAVLOCK, 1992). Esta reação é iniciada por radicais livres da molécula celulósica. A celulose é tratada com uma solução aquosa com íons selecionados

e é exposta á alta energia de radiação. Quando a molécula de celulose quebra e radicais são formados. Depois os radicais da celulose são tratados com uma solução adequada (compatível com a matriz polimérica), por exemplo acrilonitrila, metil metacrilato, poliestireno. O copolímero resultante possuem propriedades características de ambos, fibras celulósica e polímero enxertado.

Após um tratamento com por enxertia a energia superficial das fibras é aumentada para um nível mais rente à energia da matriz. Deste modo, uma melhor molhabilidade e uma adesão interfacial mais alta é obtida.

↳ *Tratamento com grupos metanol*

Compostos químicos que contém grupos (-CH₂OH) formam ligações covalente com as fibras celulósicas. Estes compostos são bem conhecidos e vastamente utilizados.

Compósito de poliéster insaturado com celulose tratada com composto de metanolmelanina mostrou diminuição de umidade e aumento na resistência a úmido (HUA, 1987A; HUA 1987B).

↳ *Tratamento com isocianato*

MALDAS et al, 1989, observaram que as propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras celulósicas são melhoradas quando estas são tratadas com isocianato, devido a formação de fortes ligações covalentes. Estudos comparativos foram realizados com os tratamentos com silano e tratamento com isocianato, e observaram que o tratamento com isocianato mostrou-se mais eficaz.

2.8 Processos de Fabricação de Compósitos

Na 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.

Devido a muitos problemas causados pelas fibras quando na utilização do método de fabricação por injeção isto é, formação de buchas dificultando o movimento da rosca, entupimento do bico de injeção e outros, observa uma tendência da mecanização da fabricação de plásticos reforçados em ritmo crescente. São vários os processos de fabricação de compósitos, possibilitando que se obtenham produtos com propriedades mecânicas distintas e sejam utilizados em campos de aplicações. Serão mostrados a seguir alguns dos mais utilizados:

2.8.1 Hand Lay-up (Processo Manual)

O processo manual consiste em se aplicar camadas alternadas de fibras, na forma de tecido ou manta, e resina ao 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.

2.8.2 Spray-up (Deposição à Pistola)

Nesse processo as fibras e a resina são depositadas ao mesmo tempo no molde. As fibras picotadas e junto com a resina são projetadas ao molde utilizando-se uma pistola. Este processo é usado na fabricação de peças de formas complexas ou peças muito grandes.

2.8.3 Filament Winding (Enrolamento)

Consiste na bobinagem de um fio contínuo que recebe a resina, sendo em seguida enrolado em um mandril. É muito utilizado na fabricação de peças cilíndricas que serão submetidas a pressões internas. É um processo que economiza os materiais empregados.

2.8.4 Moldagem à Vácuo

Aprimoramento dos processos manual e à pistola, que utiliza o vácuo para se eliminar bolhas e excesso de resina. Após a aplicação normal das fibras e resina no molde, coloca-se um filme flexível sobre o moldado, antes da cura, de maneira que se cubra totalmente o contorno do molde. O vácuo é aplicado entre o molde e o filme, sendo retiradas as bolhas e o excesso de resinas.

2.8.5 Pressure-bag (Moldagem sob Pressão)

Consiste em uma variação do processo de moldagem à vácuo, sendo que nesse processo, após a laminação normal, é aplicada uma pressão na forma de ar comprimido ou vapor sobre o filme flexível que cobre o laminado. Neste caso obtém-se um produto mais compacto e com superfícies mais lisas.

2.8.6 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, longo e orientado na direção do fluxo.

2.8.7 Moldagem por Compressão

Neste processo utiliza-se molde de duas partes tipo macho-femêa 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 ajuda de uma espátula, que também serve para retirar bolhas. O molde é fechado e cura ocorre enquanto o material está restrito às superfícies das duas partes (macho-fêmea) do molde. Geralmente o molde é aquecido para a realização da cura durante a compressão.

CAPÍTULO III

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

As fibras naturais podem ser divididas, de acordo com sua natureza, em três grupos:

- a) Fibras de origem mineral – ex: asbesto
- b) Fibras de origem animal – ex: seda, lã
- c) Fibras de origem vegetal – ex: celulósicas

As fibras vegetais são classificadas em:

- a) Fibras de gramínea – ex: bambu, bagaço de cana-de-açúcar, junco.
- b) Fibras de folhas – ex: abacá, sisal, banana
- c) Fibras de caule – ex: juta, rami, linho
- d) Fibras de fruto - ex: coco
- e) Fibras de semente - ex: algodão, sumaúma
- f) Fibras de raiz – ex: zacatão
- g) Fibras de madeira – ex: eucalipto, pinho.

Embora quase todas as fibras vegetais possam ser usadas como agente de reforço em plásticos, as fibras de folha são as mais empregadas pois, em geral, elas são mais duras do que as fibras de caule.

As fibras de folhas são geralmente conhecidas como “fibras duras” enquanto fibras de caule são conhecidas como fibras “macias”.

As fibras vegetais estão em todas as partes do mundo e são também conhecidas como fibras celulósicas, devido ao seu principal componente químico a celulose. Constituem também uma das maiores fontes de combustível para a maioria dos países em desenvolvimento do mundo.

A biodegradabilidade das fibras naturais tanto pode ser considerada como uma vantagem quanto uma desvantagem quando da sua utilização em compósitos poliméricos. No caso de se desejar produtos com tempo de vida útil

bastante limitado (produtos biodegradáveis) esta característica é vantajosa, caso contrário, é uma desvantagem. Tanto a necessidade de estabilidade dimensional quanto a termoplaticidade tem limitado o uso de materiais naturais em aplicações onde os plásticos tem predominado. Esta situação tem mudado rapidamente nos últimos anos devido às recentes inovações e desenvolvimentos tecnológicos.

Com a diminuição rápida das reservas de petróleo, consciência crescente sobre preservação do meio ambiente, e controle de poluição, grande importância foi dada à utilização de recursos renováveis na fabricação de produtos (GHOSH P. et al. ,1997).

No presente estudo a escolha da utilização da juta como reforço em matriz poliéster, deve-se ao fato da juta, ser abundante na região Norte do Brasil e apresentar características mecânicas e de molhabilidade pela matriz poliéster superiores às do sisal, que é outra fibra relevante à economia da região Nordeste do Brasil.

A juta é uma fibra de caule lignocelulosico obtida por duas espécies cultivada do gênero corchorus: "corchorus capsularis" cultivada em áreas de inundação e o "corchorus olitorius" cultivadas em zonas altas. A juta é a segunda fibra natural mais consumida no mundo, enquanto as de algodão ocupam o primeiro lugar.

A juta é uma fibra natural renovável, degrada biologicamente sem trazer nenhum resíduo prejudicial ou tóxico, é reutilizável e descartável, de fácil secagem e baixo preço. Suas maiores desvantagens são a aspereza do tecido de juta, dureza, baixa resistência a umidade, moderado encolhimento quando molhado, pobre resistência à abrasão e susceptibilidade a ataques microbianos.

A juta é um polímero natural heterogêneo. Tendo como principais constituintes celulose (82 – 85%), lignina, (12 – 14 %) e outros constituintes de menor proporção, como cêras (0,4 – 0,8%), substâncias minerais (3 – 4), proteínas (0,8 – 1,5%) etc (CARVALHO, 1997; SEMSARZADEH & AMIRI, 1985; MOHANTY & MISRA, 1995). A tabela 1, apresenta algumas características e propriedades da juta (COSTA, 1997).

Tabela 1 – Características e propriedades da fibra de juta.

Comprimento da fibra	Fibra Técnica 1,2 a 3,0 m
Diâmetro da fibra	Aproximadamente 25µm
Densidade	$1,5 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Higroscopicidade	Muito alta até 35% do peso seco. Em clima normal, a fibra absorve 12,5 a 14 % de umidade. Tolerância combinada de umidade 17,00%
Comportamento com ácido e lixívias	Muito sensível a ácidos. Lixívias não prejudicam
Cor	Em geral cinza para marron-avermelhado
Superfície da fibra	Lisa
Teste de combustão	Arde como outras fibras vegetais

A juta é empregada em tecidos de revestimentos, tapetes, sacos, barbantes, esteiras, revestimentos de paredes e produtos similares. Suas propriedades são moderadas, permitindo seu uso como reforços em plásticos e argamassa.

Dentre as fibras vegetais a juta é considerada como o material do futuro porque é relativamente barata e viável comercialmente, tem resistência e módulo mais alto do que os plásticos e é um bom substituto para as fibras convencionais em muitas situações (SHAH & LAKKAD, 1981).

PAL (1984), estudou as possibilidades de se empregar a juta como reforço na produção de compósitos de baixo custo, empregando 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 resistência às intempéries não são muito exigidas, sendo necessários estudos no sentido de melhorar a adesão fibra-matriz.

Devido as suas características físicas e mecânicas, as fibras de juta têm despertado o interesse de vários grupos como reforço em polímeros. A qualidade da interface fibra-matriz é significativa para a aplicação de fibras vegetais como reforço em plásticos e tanto métodos físicos quanto químicos podem ser utilizados

para otimizar esta interface. Dentre os métodos empregados para modificações superficiais de fibras vegetais, os mais populares são: meio químico, revestimento superficial, cianoetilação e copolimerização por enxertia. A seguir, algumas das pesquisas reportadas por diversos autores são apresentadas.

SRIDHAR et al. (1984) afirmaram que uma das desvantagens no emprego da juta como reforço em polímeros é que estas são porosas e que essa porosidade eleva bastante o consumo de resina. Para reduzir a porosidade da fibra e, portanto alto consumo de resina, desenvolveram um método que utiliza a lignina como revestimento do fio de juta. Foi feito o molhamento completo do fio de juta em uma solução de 5% (em peso) de lignina em acetona e secagem ao ar. Novamente, o fio seco era passado através de uma solução de etileno diamina em acetona e, finalmente seco em um forno a 80°C ficando apto para a produção dos compósitos por enrolamento do fio de juta numa moldura retangular. O enrolamento podia ser unidirecional e bidirecional. No caso de laminados bidirecionais, o centro consistia de duas camadas na direção 90° , colocadas entre duas outras (sandwich)na direção 0° . Foram usados fios de juta não tratados e fios revestidos com lignina. O consumo de resina com o método de revestimento do fio com lignina foi reduzido aproximadamente, em 43%. Quanto às propriedades mecânicas, os resultados dos testes indicaram (no caso dos compósitos unidirecionais) que a resistência à tração foi três vezes maior que a resistência à tração da resina poliéster sem reforço. Os testes indicaram também que a lignina que cobre a fibra de juta não afeta significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos.

GHOSH & GANGULY (1993) estudaram modificações químicas na fibra e no tecido de juta através a) copolimerização por enxertia de acrilonitrila ou metil metacrilato, e b) e introdução de fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído por diferentes concentrações, com a finalidade de elevar a característica reforçante da fibra de juta no compósito de matriz poliéster Enxerto de poliacrilonitrila (10-25%) melhorou de 10-30% resistência à flexão e o módulo de flexão dos compósitos. Modificações da fibra de juta com fenol-formaldeído ou resorcinol-

formaldeído ou valores da resistência à flexão aumentaram de 20 a 40% e os valores do módulo de flexão de 40 a 60%. O melhor desempenho na resistência do compósito foi obtido no tratamento da juta com resorcinol-formaldeído.

GHOSH & GANGULY (1994) estudaram o efeito da enxertia da poliacrilonitrila (PAN) em fibras de juta (pré-lavadas e branqueadas), usando um iniciante redox. Analisaram a cristalinidade por raio-X, resistência tênil, comportamento térmico, índice de brancura, tingibilidade, degradação por luz e resistência à umidade. Os resultados mostraram que a enxertia ocorre entre as superfície e as regiões intercelulares, como nos lúmens das fibras. Um enxerto de 20 a 30% de PAN concede, em média, propriedades físicas desejáveis, incluindo-se a resistência, o módulo e a recuperação da umidade na fibra. A enxertia com o PAN torna a fibra de juta significativamente resistente ao apodrecimento e isto é muito desejável em aplicações industriais.

SIKDAR et al. (1995) estudaram a copolimerização por enxertia da acrilonitrila sobre as fibras de juta, usando permanganato de potássio como iniciador na presença de ar. Analisaram diversos fatores na reação, como a concentração do iniciador, concentração do monômero e tempo de reação dentre outros fatores, para se determinar as melhores condições de reação. Foi empregado um sistema de iniciação que alcançasse o máximo de enxertia, com baixo custo apresentando formação mínima de homopolímeros e cuja reação pudesse ocorrer na presença de ar para tornar o processo economicamente viável.

SAHA et al. (1996) estudaram a polimerização de acrilonitrila em fibras de juta, em função de mudanças nas variáveis da reação tais como: concentração de hidróxido de sódio, mistura de solvente (benzeno e dioxano), tempo e temperatura de reação. Fibras de juta foram delignificadas progressivamente e o seu efeito na reação de cianoetilação foi estudado. Mostrou-se que era vantajoso expandir a fibra em etileno diamina antes de submetê-la à cianoetilação. Estudos de FTIR mostraram que efetivamente houve a substituição parcial de grupos de hidroxila pelo grupo cianoetila e que tanto os grupos hidroxila dos componentes celulósicos quanto os grupos hidroxila da lignina presente na juta reagiram com a acrilonitrila.

KHAN & AHMAD (1997) estudaram a copolimerização por enxertia do metil metacrilato sobre fibra de juta pré-irradiada. Amostras de juta foram irradiadas na presença de ar usando uma fonte de radiação gama. A polimerização por enxertia é dependente da concentração de emulsificante, da dose de radiação, temperatura, concentração de monômero e tempo de reação. O nível de enxertia máximo foi realizado numa faixa de temperatura de 70 - 80°C, e um tempo de reação otimizado entre 3 e 5 horas, dependendo das doses de radiação.

CARVALHO et al. (1997) investigaram a influência do tipo de poliéster e de modificação alcalina com NaOH nas propriedades tênséis de compósitos poliéster/juta. Foram utilizadas duas resinas poliéster ortoftálicas de aplicação geral: a) UC 3620 da Elekeiroz e b) Resapol 10-225 da Resana S/A aditivada com agente emulsificante. Os tecidos de juta foram imersos em uma solução de NaOH à 3% por períodos de 1, 2, 3 e 4 dias, na temperatura ambiente. Após o tratamento alcalino as fibras eram lavadas em água corrente e secas à 70°C por 1h. Concluíram que a resina poliéster de alto poder de molhamento gerou compósitos com propriedades mecânicas superiores e que o tratamento alcalino das fibras não foi significativo, pois levou a compósitos com propriedades mecânicas inferiores às dos compósitos com fibras brutas.

GHOSH et al. (1998) estudaram o efeito da copolimerização por enxertia da mistura de acrilamida e metil metacrilato a 50°C, modificando as propriedades mecânicas das fibras de juta de diferentes composições (por remoção limitada de hemicelulose e lignina das fibras de juta) em um sistema que segue uma técnica de pré-tratamento. Os resultados obtidos indicaram que o processo permite modificar amplamente as propriedades mecânicas das fibras de juta pois o grau de modificação depende do grau de enxertia obtido, das variações das composições de alimentação da mistura de monômeros e dos multiconstituintes da própria juta. Ficou evidenciado que a remoção moderada de hemicelulose é mais eficaz do que uma remoção equivalente da lignina da juta na obtenção de compósitos com propriedades mecânicas superiores.

MOHANTY et al. (1998) estudaram a cinética de copolimerização por enxertia do metil metacrilato (MMA), iniciada pelo sistema redox Ce(IV)-DMSO na faixa de temperatura de 40–60 °C. Os autores determinaram as condições ótimas de enxertia em função da concentração de monômero, iniciante e solvente. Além disso, o efeito da temperatura, tempo, concentração do ácido, quantidade de fibra de juta e taxas de sais inorgânicos e solventes orgânicos foram investigados. Um esquema cinético foi proposto com base na descoberta experimental e os espectros infravermelhos da juta modificada quimicamente e da juta enxertada foi analisado. O sistema proposto pode gerar produtos com percentual de enxertia superior a 120%. Os resultados mostram que a estabilidade térmica da fibra de juta (estudos de DSC e TGA) foi melhorada com a enxertia.

DASH et al. (1999) estudaram o desenvolvimento de compósitos de alto desempenho reforçados por juta. Compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra de juta que tem propriedades mecânicas apreciáveis foram preparados por impregnação e curados a quente. Foram preparados compósitos utilizando como reforço a juta bruta (controle) ou a juta branqueada em várias teores. Propriedades mecânicas tais como, resistência à tração e flexão, dureza e módulo, foram comparados. Os resultados mostram que compósitos com 60% em peso de fibras de juta branqueadas curados a quente apresentaram melhores propriedades de flexão e uma alta resistência inter-laminar quando comparados a compósitos poliéster/juta bruta curados a quente, embora as propriedades tenseis do último, fossem melhores. A natureza da adesão fibra-matriz foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura. Propriedades dinâmico-mecânicas muito elevadas, superiores às de compósitos semelhantes, reforçados por fibras de vidro foram obtidas. O módulo de armazenamento (em flexão) foi de 12.3 GPa à 30 °C, diminuindo lentamente com a temperatura. Segundo os autores, o grande mérito deste trabalho foi a obtenção de compósitos com elevadas propriedades mecânicas para amostras com 60% wt de carregamento de fibras e que, do ponto de vista econômico, baseando-se em relações de custo e peso, compósitos reforçados por fibras de juta branqueadas

apresentaram melhor desempenho do que os obtidos com outras fibras modificadas pelos métodos usuais de recobrimento ou de enxertia.

SAHA et al. (1999) estudaram comportamento dinâmico mecânico de compósitos poliéster/juta (não tecido), tratados quimicamente (cianoetilados) ou não. Segundos aqueles autores, compósitos com fibras tratadas exibem módulo bem mais elevado indicando uma maior rigidez e uma melhor adesão. Compósitos com fibras tratadas têm uma maior resistência à fluência a temperaturas mais baixas (até 120°C) e o oposto ocorre a temperaturas mais elevadas. A análise das superfícies de fratura por MEV demonstrou claramente melhor adesão fibra/matriz para fibras tratadas.

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 com hipoclorito de sódio e agente de acoplamento silano. Concluiu que o tratamento superficial da fibra de juta com silano é ineficiente para o sistema e 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.

CARVALHO & BATISTA (1995) investigaram o efeito de diferentes tipos de tratamentos superficiais e pré-tratamentos das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos poliéster reforçados com tecido de juta. Os tecidos foram tratados com anidrido maléico (2%), pré-polímeros derivados do óleo de mamona com grupos funcionais isocianato, polioli e uretano (5-35%) e poliacetato de vinila (10-20%). Fibras de juta pré-tratadas por imersão em solução alcalina (NaOH à 5%) e solução de detergente foram, também revestidas superficialmente com anidrido maleico, isocianato, polioli e uretano. Os resultados obtidos mostraram que os tratamentos das fibras de juta com 10% de pré-polímeros com grupamentos isocianato ou uretano foram os mais eficazes, promovendo maiores aumentos nas propriedades mecânicas dos compósitos investigados. Os autores observaram

que apesar das propriedades mecânicas dos compósitos aumentarem com o teor de fibras, para os teores de juta empregado (até 16% em peso), a resistência à tração dos compósitos foi menor do que a da matriz poliéster.

CARVALHO et al. (1997) estudaram os efeitos de modificação da matriz nas propriedades mecânicas dos compósitos poliéster/tecido de juta. A matriz poliéster modificada por adição (10% em volume) de pré-polímeros isocianato e uretano derivados do óleo de mamona. Laminados foram produzidos empregando-se três tipos de matrizes: 1) poliéster; 2) poliéster/isocianato e 3) poliéster/uretano. Os autores concluíram que, a interface fibra/matriz nos compósitos de matriz não modificada é fraca, porém a modificação da matriz com isocianato e uretano promoveu melhor adesão entre os componentes e elevou as propriedades finais dos compósitos. A modificação mais eficiente foi a que utilizou o pré-polímero isocianato.

SANTOS et al. (1999) estudaram o efeito do tratamento superficial do reforço e da modificação da matriz nas propriedades mecânicas de compósitos unidirecionais poliéster/juta. Foram fabricados compósitos em que tanto o reforço quanto a matriz foram tratados com pré-polímero derivados do óleo de mamona com grupos funcionais isocianato, uretano e polioliol. Concluíram que a resistência à tração e o módulo de elasticidade, em geral, aumentam nos compósitos com reforço tratado com pré-polímeros uretano e isocianato e que a modificação da matriz poliéster não teve um efeito significativo na resistência à tração dos compósitos.

CARVALHO et al. (1997) com intuito de reduzir a absorção de umidade, aumentar a molhabilidade das fibras pela matriz e a resistência da adesão interfacial, estudaram o efeito das condições de pré-secagem das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster/de tecidos de juta. Os resultados obtidos mostraram que a secagem prévia das fibras é fundamental para a obtenção de compósitos reforçados por fibras vegetais de qualidade e que a temperatura ideal de secagem para o sistema investigado era de 80°C. Observaram também que, o alinhamento das fibras é de fundamental importância para que as propriedades mecânicas do compósito sejam otimizadas.

Estudos mostram que a absorção de água em compósitos dependem de vários fatores, tais como temperatura, orientação do reforço, fração volumétrica da fibra, natureza da fibra (permeável ou não), área de superfície exposta, difusão e proteção superficial (ANDREPOULOS & TARANTILI, 1998).

RAO et al. (1981) estudaram as características de absorção de compósitos de matriz poliéster e epoxi reforçados com fibras de juta. Os estudos foram conduzidos, sob umidade constante e temperatura ambiente. Compósitos com fibras de juta unidirecionais não tratadas e resinas poliéster e epoxi foram fabricados usando a técnica de filament-winding. Foram curados à temperatura ambiente por 24 horas sobre pressão de 40psi, seguido de pós-cura à 100°C por 1 hora. As amostras foram cortadas e seladas em seguida secas à 100°C. As amostras secas foram imersas em água à temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), periodicamente retiradas da água secas com tecido de baixa absorção e seu peso registrado em balanças de alta precisão. Os autores observaram que as curvas de absorção aumentam com o aumento da fração volumétrica de fibra, ao passo que o tempo necessário para atingir o equilíbrio de absorção diminuiu com o teor de fibra, o que foi atribuído ao aumento da difusividade no compósito sob tais condições.

SENSARZADEH & AMIRI (1985) estudaram o sistema poliéster/tecido de juta e os efeitos do pré-tratamento da juta com tetrahidrofurano, poli (acetato de vinila) e ácido acrílico nas propriedades de tração e impacto, absorção de água e reações químicas ocorridas nestes sistemas. Os compósitos com juta tratada com tetrahidrofurano apresentaram queda na resistência ao impacto e alta de absorção de água; a aplicação de PVAc indicou uma melhora limitada nas propriedades mecânicas e na absorção de água, enquanto elevadas propriedades mecânicas e baixa absorção de água foram obtidas para os compósitos de fibras tratadas com ácido acrílico.

IDRISS et al. (1994) estudaram as propriedades mecânicas e físicas de filmes curados com radiação ultra-violeta, produzidos a partir de formulações com acrilato de uretano em combinações com monômeros, fotoiniciador e

plastificantes. Seis formulações foram preparadas com acrilato de uretano e os aditivos, para cobrir os tecidos de juta e cura-los com radiação UV. Os filmes preparados com essas formulações foram caracterizados para se determinar as formulações capazes de melhorar as propriedades da juta. Os autores concluíram que a resistência tênil aumentou em torno de 80%, a alongação mais de 300% e a redução da absorção de água ficou em torno de 60%.

SONI & SONI (1999) estudaram laminados de 12mm de espessura, a base de resina fenólica modificada (resol) reforçados por tecidos de juta ou de algodão. As propriedades físicas, mecânicas e elétricas dos laminados foram determinadas. Os resultados mostraram que a resistência à tração e flexão do compósito fenólicos reforçados por tecidos de juta foram cerca de 10 a 20% mais altas e a resistência à punção e à delaminação foi 15 a 20 % menor que a dos compósitos reforçados por tecidos de algodão. Uma menor resistência ao isolamento elétrico foi observada nos compósitos reforçados por tecidos de juta. A resistência diéletrica e as propriedades físicas como densidade especifica e absorção de água foram equivalentes para os compósitos fabricados com os dois tipos de reforço estudados.

Investigações têm sido realizadas para se obter informações sobre o tempo de vida útil dos compósitos submetidos tanto às intempéries como também à altas temperaturas e suas características térmicas, pois estas informações são de suma importância para as indústrias.

BARDURI et al. (1994) caracterizaram a fibra de juta termicamente por DSC, DTG e TG, e identificaram os principais compostos químicos constituintes: hocolulose, 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 a degradação térmica.

VERDU, 1994, estudou o efeito do envelhecimento térmico nas propriedades mecânicas de polímeros. Os principais tipos de degradação (homogênea e heterogênea) e seus efeitos nas propriedades mecânicas foram investigados. O autor concluiu que as alterações nessas propriedades dependem do tipo de envelhecimento bem como do polímero em estudo, propondo alguns modelos para descrever os tipos de degradação.

MEDEIROS E CARVALHO (1999) estudaram as propriedades mecânicas em tração de compósitos poliéster/fibra de 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 poliéster fibra de juta.

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.

Uma das formas encontradas para melhorar as propriedades de compósitos reforçados por fibras vegetais é o desenvolvimento de materiais híbridos.

SHAH & LAKKAD (1981) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos à base de resina poliéster ou epoxi reforçados unidirecionalmente com fibras de juta e vidro, e compósitos híbridos de juta/fibra de vidro. Os resultados mostraram que laminados reforçados com juta apresentam propriedades superiores às das matrizes, mas estas propriedades são inferiores às dos compósitos reforçados com fibra de vidro. Segundo os autores, o papel mais adequado para as fibras de juta é serem utilizadas como fibras de enchimento, em combinação com fibras de vidro, em aplicações onde a resistência e o módulo requeridos não sejam muito elevados. A fibra de juta

consome muita resina, e este problema foi parcialmente resolvido com a produção de compósitos híbrido.

SRIDHAR et al. (1984) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos unidirecionais reforçados por juta e híbrido juta/vidro. Os autores concluíram que a resistência dos compósitos uni e bidirecionais foram 3 e 1,5 vezes maiores, respectivamente, a da matriz. Já os compósitos reforçados com o híbrido juta/vidro apresentaram propriedades superiores e custos 2/3 inferior ao compósito reforçado com fibras de vidro.

JOSEPH & CARVALHO, (1999b) estudaram o comportamento mecânico do compósito de matriz poliéster reforçados com um tecido híbrido, tendo fibras de algodão no urdume e fibras de juta na trama, em função do teor e orientação das fibras. Até então, a literatura reportava apenas estudos com compósitos híbridos laminados, com camadas intercaladas de um outro reforço. Os resultados mostraram que as propriedades dos compósitos testados na direção das fibras de juta aumenta com o teor de fibras no compósito até um carregamento de 50% (em peso) de fibras, tendendo a decrescer a teores mais elevados. Uma resistência à tração 220% superior à da matriz foi obtida. A resistência do compósito é insensível ao teor de algodão e, nesta direção a resistência à tração é 50% inferior à da matriz. Os autores concluíram, que os compósitos estudados podem ser utilizados em aplicações estruturais e que os tecidos híbridos utilizados de forma mais rápida e fácil e versátil, quando comparados às mantas de fibras curtas ou unidirecionais.

CARVALHO et al. (1999) avaliaram as propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados por tecidos híbridos juta/vidro e juta/algodão. Foram confeccionados tecidos híbridos juta/algodão e sisal/algodão, tendo no urdume fios de algodão e na trama cordões de juta e sisal, também tecidos híbridos juta/vidro, tendo no urdume cordões de juta e na trama fibra de vidro. A composição dos tecidos foi a) algodão/juta: 28% de algodão e 72% de juta, b) algodão/sisal: 22% de algodão e 72% de sisal e c) juta/vidro: 44% de juta e 56% de vidro. Estes tecidos foram utilizados como reforço em compósito de matriz poliéster e suas propriedades mecânicas em tração analisadas, em função do teor

total e relativo de fibras no compósito e da orientação das mesmas. Os resultados mostraram que, em todos os casos, independente do tipo de tecido empregado como reforço, as propriedades dos compósitos aumentaram com o teor de fibras na trama, isto é, com o teor de juta, sisal e vidro e que a resistência dos compósitos testados na direção do urdume foi sempre inferior à da trama. No caso dos tecidos tendo fios de algodão no urdume, a resistência praticamente não foi afetada pelo teor de fibras, enquanto que para os compósitos híbridos com vidro, tendo no urdume cordões de juta, a resistência aumentou com o teor de fibras. Indicaram que tecidos híbridos tramados a base de fibras vegetais podem ser utilizados como reforço em compósito de matriz poliéster. Compósitos até 5 vezes mais resistentes; 2,3 vezes mais rígidos e capazes de alongarem 2 a 5 vezes mais do que a matriz puderam ser obtidos e os reforçados por juta/vidro geraram produtos com propriedades mais isotrópicas. Os autores concluíram, então, que tecidos híbridos tramados a base de fibras vegetais podem ser utilizados como reforço em compósitos de matriz poliéster.

NÓBREGA (2000) estudou o comportamento mecânico de compósitos de matriz poliéster, reforçados por um tecido híbrido juta/vidro. O tecido híbrido era composto por 44% em peso de fibras de juta no urdume e 56% em peso de fibras de vidro na trama. As propriedades mecânicas foram determinadas em função do teor de fibras e da direção de solicitação do ensaio como também dos compósitos com 2, 4 e 6 camadas de reforço híbridos disposto em seqüência de empilhamento de 0/90°. As propriedades de compósitos reforçados por um tecido tramado de fibras de vidro contendo 1 a 6 camadas de reforço também foi determinadas.

O autor concluiu que houve um aumento nas propriedades mecânicas de todos os compósitos com o aumento do teor de reforço. Quando os testes foram realizados na direção das fibras de vidro, as propriedades se apresentaram mais elevadas do que quando testada na direção da fibra de juta, o que foi atribuído às propriedades dos componentes individuais do tecido e ao fato das fibras de juta estarem disposta em urdume. Os compósitos reforçados por tecidos híbridos com seqüência de empilhamento 0/90°, apresentaram propriedades intermediárias às obtidas para compósitos equivalentes testados no sentido longitudinal às fibras de vidro ou às fibras de juta.

CAPÍTULO IV

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Fibra de juta

A juta empregada foi o tecido com classificação 2J, fornecido pela Cia Têxtil Castanhal, PA. Trata-se de um tecido empregado em sacaria, pela urdidura e trama de fios de 1,5mm de diâmetro em média, malha relativamente estreita e peso teórico 340 g/m².

A convenção adotada neste trabalho foi a seguinte:

###Fibra bruta: tecido de juta empregada na forma que foi recebida da indústria.

###Fibra tratada: tecido de juta que recebeu a aplicação de agentes modificadores superficiais (pré-polímeros derivados do óleo de mamona, com grupos funcionais isocianato ou uretano).

4.1.2 Poliéster

Foi empregado o poliéster insaturado ortoftálico pré-acelerado, de cor clara, totalmente polimerizável, de baixa reatividade e baixa viscosidade, fornecido pela RESANA S/A sob o código RESAPOL 10-225.

Algumas das principais características da resina poliéster usada são:

- cura rápida à temperatura ambiente (mediante sistema catalítico);
- laminado de cor clara, o que permite a visualização de bolhas;

- pequena contração durante a polimerização;
- excelentes qualidades mecânicas finais
- boa resistência aos agentes atmosféricos.

Tabela 2 – Propriedades da resina poliéster.

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÃO
Aparência visual	Levemente Castanho
Viscosidade Brookfield, à 25 °C (30 rpm, sp2)	250 - 350
Peso Específico a 20°C g/cm ³	1,10
Índice de Acidez, mgKOH/g	30 máximo.
Índice de Tixotropia	1,20-1,40
Tempo de Gel, - Curva Exotérmica ⁽¹⁾	22-26 min..
Temperatura Máxima – Curva Exotérmica	130-150 °C
Tempo Mínimo de cura – curva Exotérmica	40 – 50 minutos.
(1) 100,0 g de Resina a 25 °C, com 1% de peróxido de MEK (metil Etil Cetona)	

Fonte: RESANA S/A

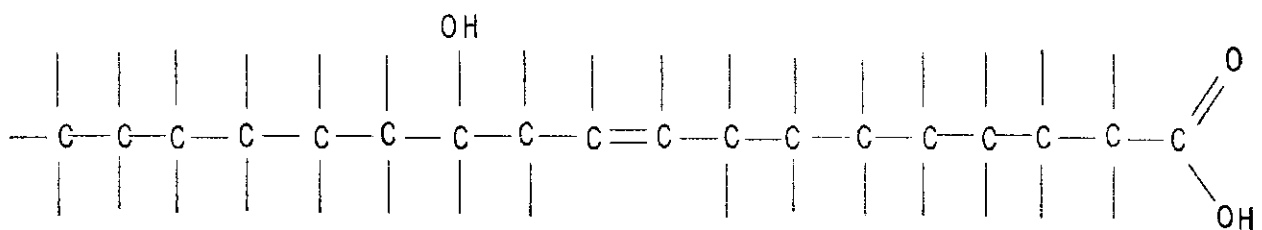
4.1.3 Estireno

Empregou-se o monômero de estireno fornecido pela Estireno do Nordeste S.A–EDN, que foi utilizado como recebido. A estrutura do monômero é CH₂CHC₆H₅. O monômero de estireno, além participar da reação de reticulação também pode atuar como solvente para a resina e para os agentes de acoplamento.

4.1.4 Modificadores Superficiais Utilizados

Na modificação superficial das fibras utilizou-se produtos derivados do óleo de mamona. Estes produtos, além de possuírem grupos funcionais compatíveis ou reativos com os grupos OH das fibras lignocelulósicas, também são oriundos de fonte renováveis e pouco prejudiciais ao meio ambiente.

O óleo de mamona, também chamado de óleo de rícino, triglicérideo do ácido ricinoleico (ácido 12 hidroxioleico), é um insumo que pode ser obtido comercialmente com alto grau de pureza. Sua estrutura é de um triol e é um dos mais satisfatórios materiais para reações uretanos. Estruturalmente, o ácido 12 hidroxioleico possui um grupo carboxila e um grupo hidroxila localizado no carbono 12, próximo da ligação olefínica (insaturado) entre o carbono 9 e 10:



ÁCIDO RÍCINOLEICO

Essas funções orgânicas podem ser exploradas intensamente proporcionando possibilidades de se confeccionar macromoléculas (polióis ou pré-polímeros) com diferentes funcionalidades e massas molares, criando condições de obter polímeros poliuretânicos com as mais variadas estruturas e propriedades.

Os polióis vegetais com base do ácido ricinoleico, são excepcionalmente estáveis resultando em ligações uretanos de qualidade superior e de elevada resistência ao ataque por hidrólise. Uma das maiores características ligadas ao ácido ricinoleico é a viabilidade da síntese de polióis de maior funcionalidade em

reações de esterificação e, também de polióis com baixa funcionalidade, por redução do conteúdo de hidrólise (PROQUINOR).

4.1.4.1 Pré-Polímero Isocianato

O grupo funcional isocianato é extremamente reativo, podendo reagir com: a) água gerando amina e dióxido de carbono; b) compostos hidroxilados gerando uretano; c) amina levando à formação de uréia substituída; ou d) ácido formando amidas. O pré-polímero derivado do óleo de mamona contendo grupos funcionais isocianato foi fornecido pela PROQUINOR, e foi obtido pela reação do polioliol derivado do óleo de rícino com uma mistura de MDI/TDI. O produto apresenta as seguintes características:

VISCOSIDADE (2S)	- 3000cps
% DE NCO livre	- 15 %

4.1.4.2 Polioliol

O polioliol de nome comercial GARACIN, tem como base o óleo de rícino e possui três grupos hidroxilas que reagem com di ou poli isocianatos para formar ligações cruzadas nos sistemas de poliuretano. Os polióis derivados do óleo de rícino, com várias funcionalidades, são indicados para o uso em reações de uretano. Esses polióis diferem quimicamente dos polióis poliésteres. Eles possuem menos grupos ésteres e não tem ligações éter, encontradas nos poliésteres, e são mais estáveis à hidrólise do que os outros polióis. O polioliol utilizado neste trabalho é a base de óleo de mamona (GARACIN 230 A) fornecido pela PROQUINOR e apresenta as seguintes características:

Tabela 3 – Características do polioliol (GARACIN 230 A)

Hidroxila (mg KOH / g amostra)	230 +/- 10
Acidez (mg KOH / g amostra)	máx 3
Saponificação (mg KOH / g amostra)	175 – 185
Iodo (cg I / g amostra)	60 – 65
Viscosidade (cps a 25 ^o C)	700 – 800
Umidade (Karl Fischer)	< 0,1 %
Densidade (g / cm ³ a 20 ^o C)	0,9 – 1,0
Funcionalidade (range 2,5 – 3,5)	3
Peso Molecular médio	873,47

Fonte: PROQUINOR

4.1.4.3 Uretano

Os poliuretanos resultam da reação de um di-isocianato com um composto rico em hidroxilas. Os di-isocianato usados na preparação dos poliuretanos são geralmente do tipo aromático, sendo o mais comum deles os isômeros 2,4 e 2,6-di-isocianato de tolileno (TDI). O 4,4-di-isocianato de difenilmetano (MDI) também é usado em menor escala.

O uretano utilizado neste estudo foi obtido pela reação de 1:1,15 dos pré-polímeros isocianato e polioliol acima descritos.

4.1.4.4 Desmoldante

O poliéster tem a tendência a aderir às superfícies, mesmo bem lisas, por isso, o uso de desmoldante é obrigatório para evitar a sua aderência ao molde. O desmoldante utilizado neste trabalho foi a cera parquetina.

4.2 Metodologia

Os tecidos de juta foram cortadas nas dimensões do molde de compressão. Parte dos tecidos receberam os tratamentos superficiais com os pré-polímeros isocianato e uretano, tanto os tecidos brutos como os tratados foram submetidos à pré-secagem 90°C/24h antes do processamento do compósito para efeitos de avaliação e comparação das propriedades com os compósitos com tecido de juta tratados ou não sem pré-secagem.

4.2.1 Tratamento dos tecidos de Juta com Isocianato e Poliuretano

A metodologia empregada para a aplicação do isocianato e poliuretano foi a mesma. As fibras brutas, após o corte, foram pesadas e em seguida receberam a aplicação dessa duas substâncias.

Os pré-polímeros isocianato e uretano foram dissolvidos em monômero de estireno para diminuir a viscosidade e facilitar sua aplicação nas fibras. Essa solução era preparada num becker e aplicada manualmente com um pincel de ½", que absorvia pequenas quantidades dessa solução, permitindo um molhamento mais eficaz sobre toda a superfície da tecido de juta.

O isocianato e o poliuretano foram empregados nas proporções de 10% em peso sobre o peso do tecido de juta, por exemplo, o peso do tecido de juta foi de aproximadamente 10g então usou-se 1g de agente de acoplamento. A relação de agente de acoplamento/solvente foi de 1:3, para que a solução obtida fosse suficiente para molhar completamente o tecido de juta.

Após a aplicação do agente de acoplamento os tecidos eram passados por uma calandra, operando à temperatura ambiente, para melhorar a impregnação e colocados para secar a temperatura ambiente.

4.2.2 Preparação dos Laminados com Tecidos Brutos e Tratados Pré-secos ou não.

Os laminados foram produzidos a partir de um molde de compressão nas dimensões 200mm x 150mm x 2mm.

O procedimento constitui em preparar o molde, isto é, polir e passar cera para facilitar a desmoldagem. Colocou-se parte da resina já misturada com o catalisador no molde e em seguida o tecido de juta bruta já pesado e com a espátula pressiona-se a juta até ficar completamente molhada pela resina e, por fim é colocado o restante da resina. Quando a resina estava próxima do ponto de gelificação o molde foi fechado e colocado na prensa sobre pressão de 8 toneladas à temperatura ambiente durante 8 horas até completar o ciclo de cura. Após este período era efetuada a desmoldagem, e só após 48h foram confeccionados os corpos de prova. Com os tecidos submetidos à pré-secagem antes do laminado tomou-se o cuidado de garantir que o molde já tivesse uma camada de resina e que o procedimento fosse o mais rápido possível, de modo a evitar a reabsorção de umidade pelos tecidos de juta.

4.2.3 Teor de Fibras

O teor de fibras foi determinado por gravimetria e o seguinte procedimento foi utilizado: pesou-se o tecido de juta (cortado nas dimensões do molde) antes do processamento do laminado e depois pesou-se o laminado. Com os pesos obtidos determinou-se o teor de fibras (em peso) da seguinte forma:

$$T_f (\%) = \frac{P_{TJ}}{P_L} \times 100$$

onde T_f é o teor de fibras, P_{TJ} é o peso (gr) do tecido de juta e o P_L peso do laminado.

4.2.4 Confeção dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração

Foram produzidos laminados de 2 e 4 camadas de tecidos de juta. O procedimento usado na preparação dos laminados com duas ou mais camadas é o mesmo já descrito, isto é, camadas alternadas de resina e juta.

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

comprimento: 130 mm;
largura: 12,7 mm;
espessura: 2 mm;
comprimento útil: 60 mm.

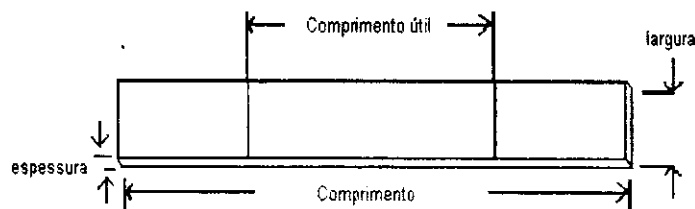


Figura 4.1. Ilustração esquemática dos corpos de prova confeccionados segundo a norma ASTM D-3039

4.2.5 Envelhecimento dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram envelhecidos em estufa de secagem com circulação de ar a 110°C no intervalo de 10 a 50 dias de exposição. A cada 10 dias foram retiradas amostras para que suas propriedades mecânicas (resistência

à tração, módulo young e deformação) fossem avaliadas e comparadas com outros sem envelhecimento térmico

4.2.6 Ensaio Mecânicos

Os testes de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios TESTOMETRIC MICRO 350, segundo as normas ASTM D 3039 para ensaios de tração. Foram testados 5 corpos de prova para cada composição a uma velocidade de 0.5 mm/min.

4.2.7 Absorção de Água

Para os ensaios de absorção foram confeccionados corpos de prova 67 x 12,7mm com espessuras variáveis em função do teor de fibra, ou seja, $1,69 \pm 0,04$ mm (~30% fibra) e $2,04 \pm 0,04$ (~50% fibra).

As amostras foram seladas, isto é, os corpos de prova foram recobertos por resina ao longo das arestas para evitar o contato direto da água com as fibras e em seguida as amostras foram colocadas em estufa a 105°C até a eliminação total da água. Imediatamente depois de secas as amostras foram pesadas e em seguida imersas em água destilada à temperatura ambiente. Em tempos pré-determinados as amostras eram retiradas da água, secas rapidamente com papel ou tecido de baixa absorção pesadas em balança analítica, com precisão de 0,1mg. O teor de água absorvido foi calculado comparando-se os pesos inicial e após a exposição.

CAPÍTULO V

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades Mecânicas sob Tração

5.1.1 Efeito do teor de fibras no comportamento mecânico dos compósitos

Há vários estudos que mostram que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais aumenta significativamente a elevados teores de fibras (CHAWLA & BOSTOS, 1979; D'ALMEIDA, 1987; MOHANTY & MISRA, 1995; CARVALHO, 1996; DASH, et al., 1999).

Analisando a Figura 5.1 fica evidenciado que a introdução do tecido de juta na matriz poliéster provocou um decréscimo de 25% na resistência à tração dos compósitos com 2 camadas de tecido de juta (29% em peso). Já para os compósitos com 4 camadas de tecido de juta (51% em peso) houve um acréscimo de 20 e 56% na resistência à tração em relação a matriz e ao compósito com 2 camadas respectivamente. 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 como inclusões ou defeitos. A baixo teores de fibras, este efeito sobrepuja o efeito reforçante das fibras sendo solicitadas na direção longitudinal e o resultado é um decréscimo na resistência do compósito com elevados teores de fibra, as propriedades do compósito passam a ser dominados pelas fibras sendo solicitadas na direção longitudinal e o tecido passa a atuar como elemento de reforço.

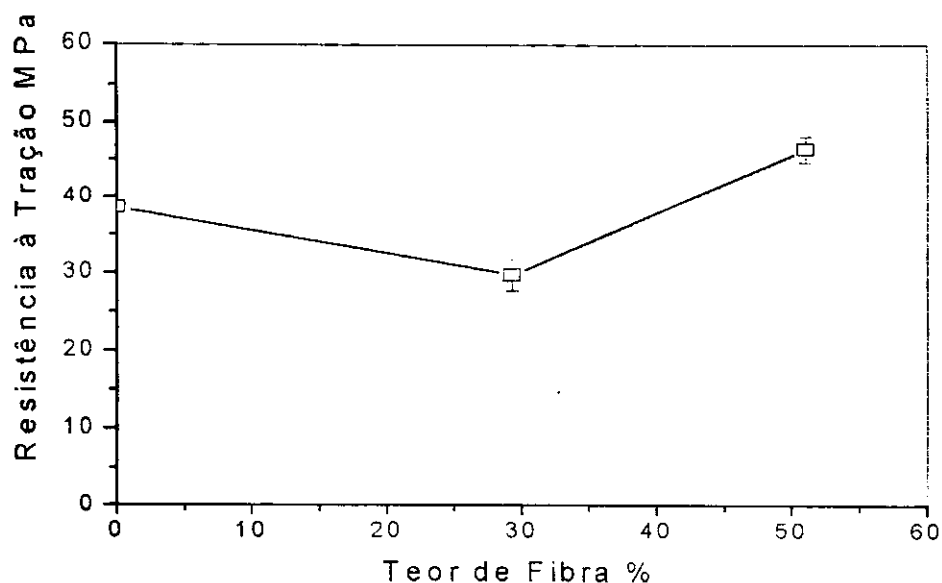


FIGURA 5.1 - Resistência à Tração x Teor de Fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

Na Figura 5.2 observa-se que o módulo young (módulo de elasticidade na tração) aumentou em cerca de 33% em relação ao poliéster, com a incorporação de 2 camadas de tecido de juta bruta (29% em peso). Com o aumento do teor de fibras para 4 camadas (51% em peso) houve um aumento de 56 e 108% em relação à 2 camadas e à matriz respectivamente, o que mostra que a inclusão das fibras elevam a rigidez do compósito. Resultados semelhantes foram reportados por JOSEPH (1999b) e NÓBREGA (2000), para compósitos de matriz poliéster, moldados por compressão, reforçados por tecidos híbridos de algodão/juta, e juta/fibra de vidro, respectivamente. Este comportamento já era esperado, visto que a resistência e o módulo das fibras utilizadas são superiores ao da matriz. Além disto, as fibras diminuem o movimento livre das cadeias poliméricas e o resultado é um aumento no módulo elasticidade do compósito com o teor de fibras (D'ALMEIDA, 1987).

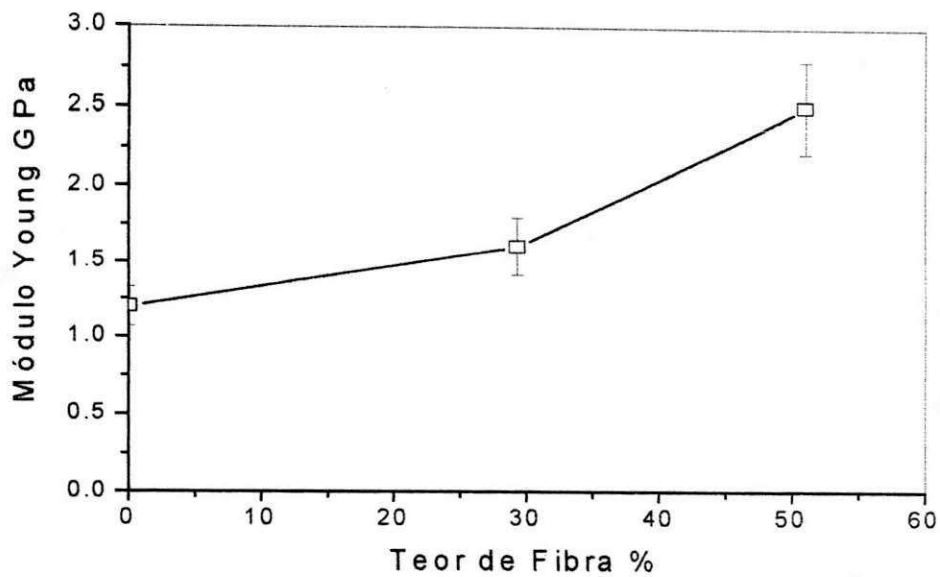


FIGURA 5.2 - Módulo Young x Teor de Fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

Na Figura 5.3 ficou evidenciado que a incorporação do tecido de juta reduziu a deformação na ruptura que variou muito pouco em função do teor de fibra, mantendo-se inferior à da matriz. Isto é atribuído à maior rigidez da fibra, elevando a rigidez do compósito.

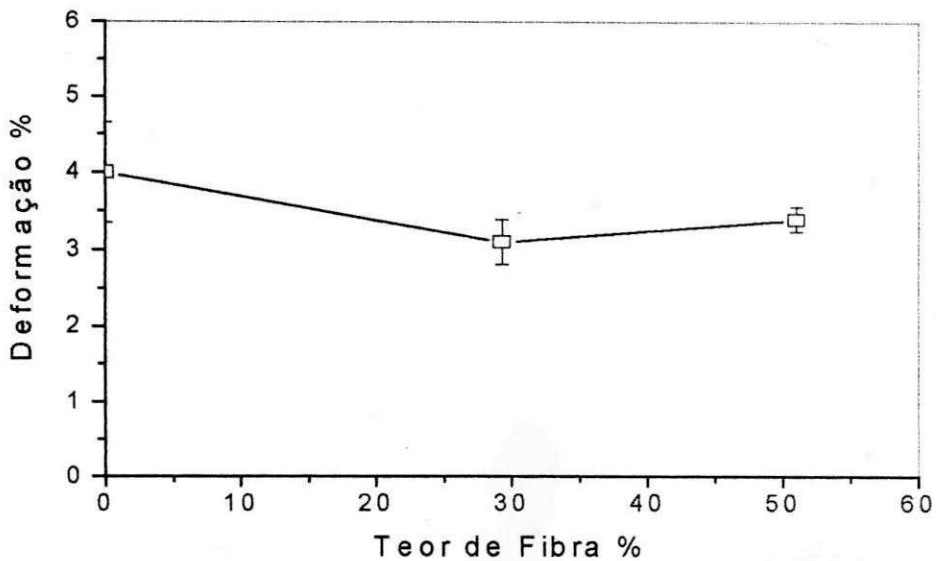


FIGURA 5.3 - Deformação x Teor de Fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

5.1.2 Efeito do tratamento superficial dos tecidos no comportamento mecânico dos compósitos

No trabalho em questão o propósito das modificações superficiais é diminuir a absorção de umidade e também aumentar a molhabilidade das fibras pela resina, aumentando a adesão interfacial, e portanto, a resistência à umidade e as propriedades mecânicas finais do compósito.

A Figura 5.4 ilustra a resistência à tração na ruptura dos compósitos com tecidos tratado superficialmente com os pré-polímeros uretano e isocianato. Os resultados obtidos mostram que o tratamento com isocianato foi mais eficaz que o tratamento com uretano. Este comportamento era esperado pois o pré-polímero isocianato utilizado tem maior teor de grupos isocianato disponíveis para reagir do que o pré-polímero uretano. Portanto, a possibilidade de interação química entre a fibra, o modificador superficial e a matriz é maior com o pré-polímero isocianato. Estudos realizados em outros sistemas (RAJ et al, 1989a, RAJ et al, 1989b, MALDAS 1989) apontavam para a capacidade de formação de ligações entre os grupos isocianato e as hidroxilas da celulose e da lignina presente na juta e, em estudos realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais da UFPB em sistemas análogos por (BATISTA, 1997) este comportamento havia sido observado.

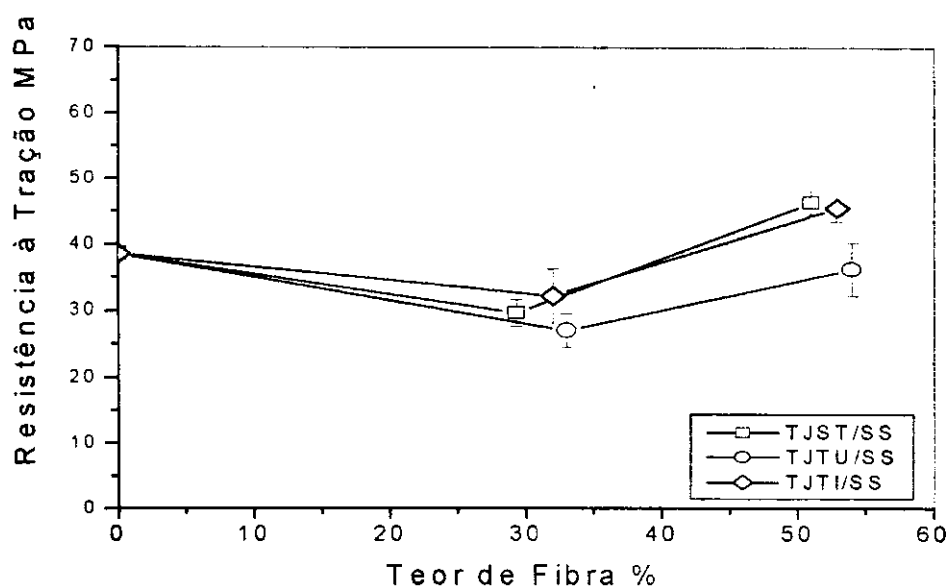


FIGURA 5.4 - Resistência à Tração x Teor de Fibra dos compósitos com tecidos de juta brutos e tratados com uretano e isocianato.

Observa-se na Figura 5.5 que os compósitos com fibras tratada com uretano apresentaram baixa rigidez, tanto para 2 camadas (33% em peso) como para 4 camadas (54% em peso), quando comparados aos reforçados por tecidos de juta brutos ou tratados com isocianato. Este resultado já era esperado pois não só o uretano obtido é elastomérico quanto o pré-polímero isocianato tem mais grupos isocianatos livres para reagir com a juta do que o pré-polímero uretano empregado.

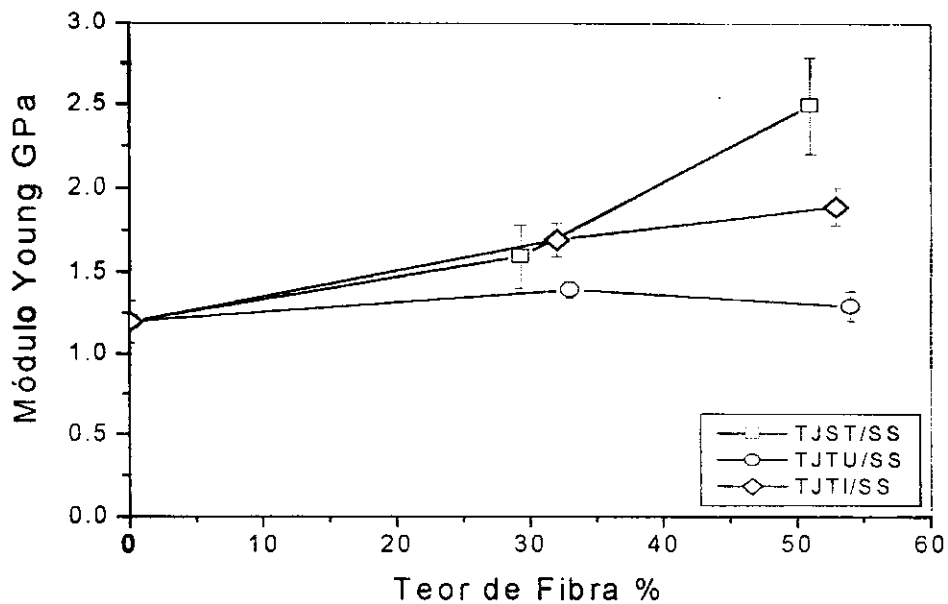


FIGURA 5.5 - Módulo Young x Teor de Fibra dos compósitos com tecidos de juta brutos tratados com uretano e isocianato.

A Figura 5.6 ilustra os resultados de deformação dos compósitos tratados tanto com uretano como isocianato não tiveram variações significativas quando levado em consideração o teor de fibras e o erro experimental. De modo geral houve uma leve tendência dos compósitos reforçados por fibras tratadas com uretano apresentarem um alongamento na ruptura superior ao dos demais, o que é atribuído à sua natureza elastomérica.

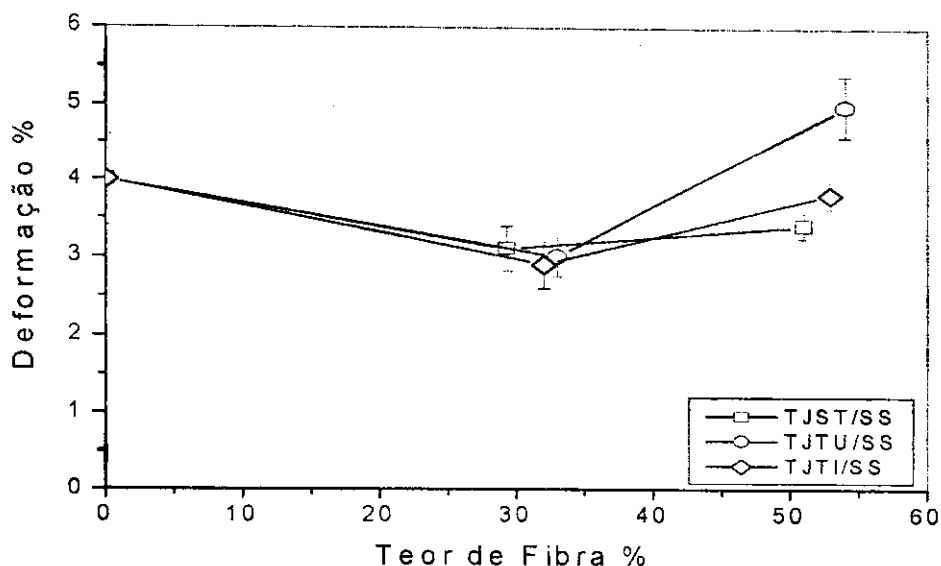


FIGURA 5.6 - Deformação x Teor de Fibra dos compósitos com tecidos de juta brutos e tratados com uretano e isocianato.

5.1.3 Efeito da pré-secagem nas propriedades dos compósitos

A pobre molhabilidade e característica de adesão da juta com a resina poliéster são atribuídas à sua natureza hidrofílica. Esta fibra lignocelulósica, possui grande número de grupos OH livres que absorvem umidade, enquanto a matriz utilizada, apesar de possuir alguns grupos OH e COOH terminais, é essencialmente hidrofóbica. A umidade das fibras vegetais afeta negativamente as propriedades dos compósitos. Muitos trabalhos de pesquisa têm reportado o efeito da umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos. Compósitos reforçados por fibras com alto teor de umidade podem apresentar vazios ou porosidades na interface, empobrecendo a adesão fibra/matriz e causando uma deterioração das suas propriedades (MOHANTY & MISRA, 1995).

A secagem prévia das fibras vegetais, imediatamente antes do processamento do compósito tem demonstrado ser um fator importante na obtenção de produtos de qualidade (BATISTA et al. 1997; MITRA et al., 1998; BLEZDKI & GASSAN, 1999).

A Figura 5.7 compara a resistência à tração de compósitos reforçados por tecidos de juta pré-secos tratados ou não, com a de compósitos reforçados por tecidos tratados superficialmente ou não e que não foram previamente secos. Os resultados indicam que a pré-secagem das fibras aumentou consideravelmente a resistência dos compósitos. Para os compósitos com 2 camadas de tecidos de juta a resistência aumentou em 35% para os brutos, 41% para os tratados com uretano e em 20% para os tratados com isocianato. Para os compósitos contendo 4 camadas de tecidos de juta o aumento da resistência com a pré-secagem foi de 18% para os brutos, 26% para os tratado com uretano e em 12% para os tratados com isocianato. A discrepância entre os teores de fibras dos compósitos secos (26 e 44% brutos, 29 e 48% uretano e 30 e 47% isocianato) e não-secos (29 e 51% brutos, 33 e 54% uretano e 32 e 53% isocianato), reforçados por 2 e 4 camadas de tecidos respectivamente, é reflexo do elevado teor de umidade das fibras (~15%). Mesmo apresentando teores de fibra inferiores (~12-13%), os compósitos reforçados por tecidos pré-secos apresentaram resistência à tração superiores, o que indica que com a diminuição da umidade houve melhora significativa de interação fibra/matriz.

Comportamento similar para compósitos com tecidos brutos foram observados por PAL et al (1984) e BATISTA et al. (1997). Estes estudos também evidenciaram que a secagem prévia das fibras é de fundamental importância na produção de compósitos reforçados por fibras vegetais de qualidade e com propriedades mecânicas otimizadas.

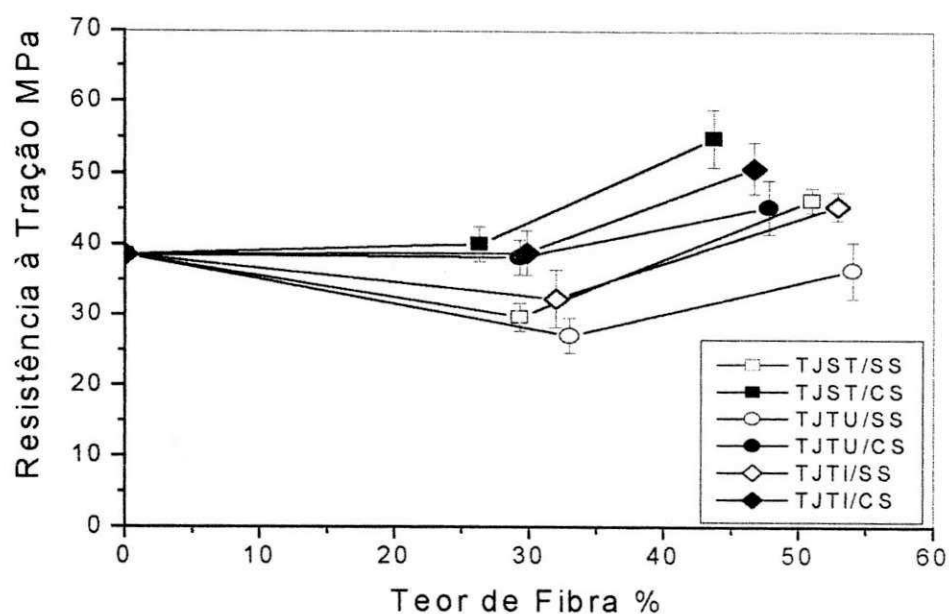


FIGURA 5.7 - Resistência à Tração x Teor de Fibra para compósitos poliéster/tecido de juta brutos e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem e moldados por compressão

A Figura 5.8 ilustra o módulo Young dos compósitos com reforços submetidos à pré-secagem. Resultados análogos aos observados para a resistência à tração foram observados, isto é, a pré-secagem levou a resultados superiores de módulo (aumento de rigidez) e redução no teor de fibras no compósito, o que é tido como indicativo de uma melhor interação fibra/matriz. A influência da pré-secagem foi maior no módulo young do compósito com tecido de juta tratados com uretano que chegou a aumentar seu módulo em até 50%. Mas mesmo assim para alto teor de reforço continuou apresentando um rigidez inferior à dos compósitos com tecido tratado com isocianato e brutos pré-secos ou não.

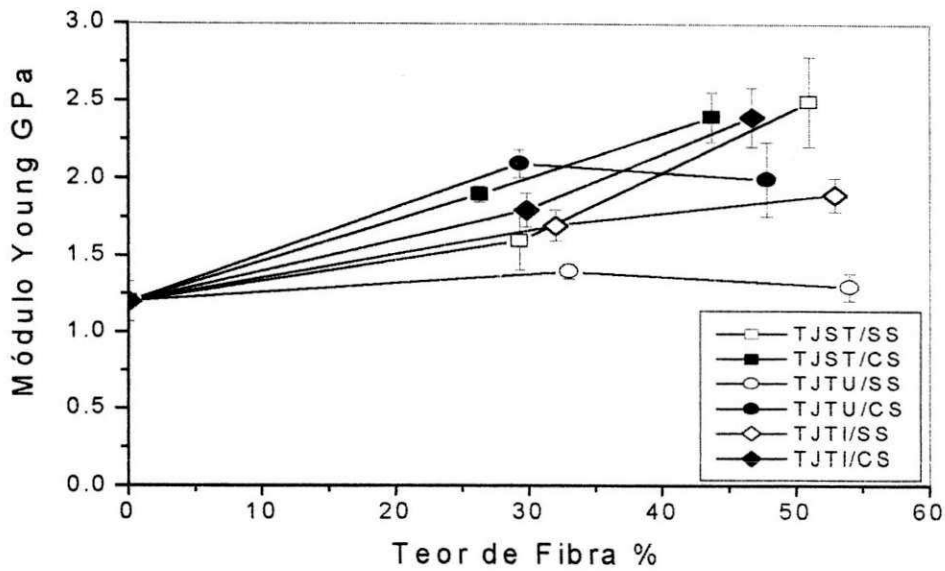


FIGURA 5.8 - Módulo Young x Teor de Fibra para compósitos poliéster/tecido de juta brutos e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem e moldados por compressão

A Figura 5.9 ilustra a deformação à ruptura dos compósitos com reforço submetidos à pré-secagem. Observa-se uma leve tendência a um aumento nesta propriedade com a pré-secagem dos tecidos. Esperava-se que a deformação fosse reduzida com a pré-secagem do reforço pois a ausência de umidade na fibra promove uma melhor adesão com a matriz e maior rigidez do sistema. As discrepâncias observadas talvez possam ser atribuídas ao menor teor total de fibras dos compósitos reforçados com tecidos pré-secos. De todo modo, as diferenças observadas não são significativas e encontram-se praticamente dentro do erro experimental observado.

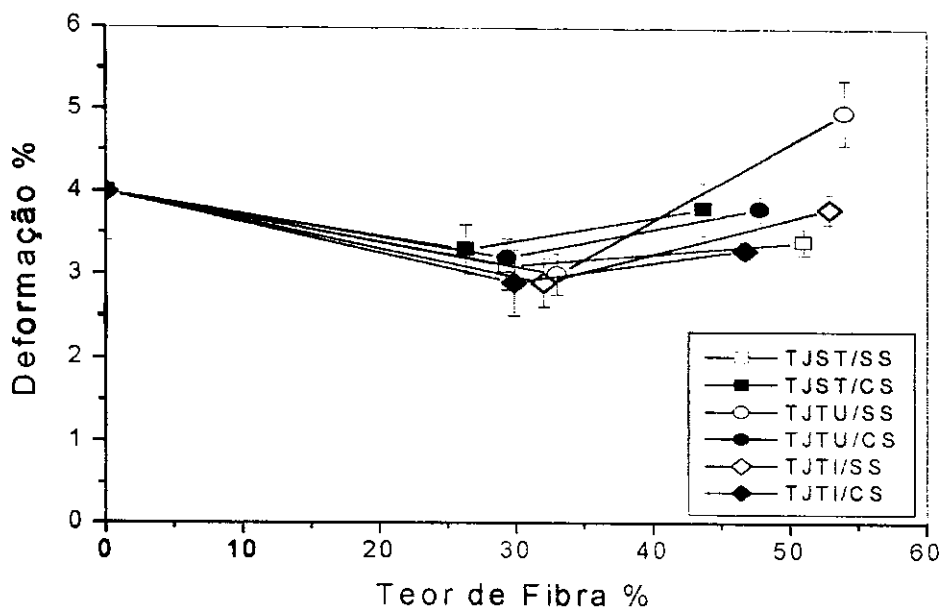


FIGURA 5.9 - Deformação x Teor de Fibra para compósitos poliéster/tecido de juta brutos e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem e moldados por compressão

5.1.2 Envelhecimento Térmico

5.1.2.1 Efeito do Envelhecimento Térmico no Comportamento Mecânico dos Compósitos

Os dados obtidos para o comportamento dos compósitos poliéster/tecido de juta, à tração, em função do tempo de exposição em estufa a 110°C estão representados esquematicamente nos gráficos abaixo.

A Figura 5.10 ilustra o comportamento da resistência à tração na ruptura da matriz e dos compósitos reforçados por fibras brutas, isto é, sem tratamento superficial e sem pré-secagem, em função do tempo de exposição térmica. Os resultados indicam que, nos primeiros 10 dias de exposição, as resistências da matriz e dos compósitos sofreram uma redução de 30 a 40% do seu valor original, permanecendo praticamente inalterados para tempos de exposição mais longos. Esperava-se que, sendo a matriz termofixa, as suas propriedades não fossem tão sensíveis ao envelhecimento térmico nas condições experimentais adotadas. Além disto, em estudos semelhantes desenvolvidos nos laboratórios, o que se

verificou foi uma manutenção das propriedades nos períodos iniciais de exposição e um posterior decréscimo para tempos mais longos de envelhecimento (MEDEIROS & CARVALHO, 1999). É provável que este comportamento esteja associado ao tipo (grade) de poliéster utilizado. Os resultados experimentais obtidos mostram que as modificações estruturais ocorridas são características da resina utilizada e que, após as alterações iniciais, tanto a matriz quanto os compósitos não sofreram alterações subsequentes mantendo-se estáveis nas condições empregadas.

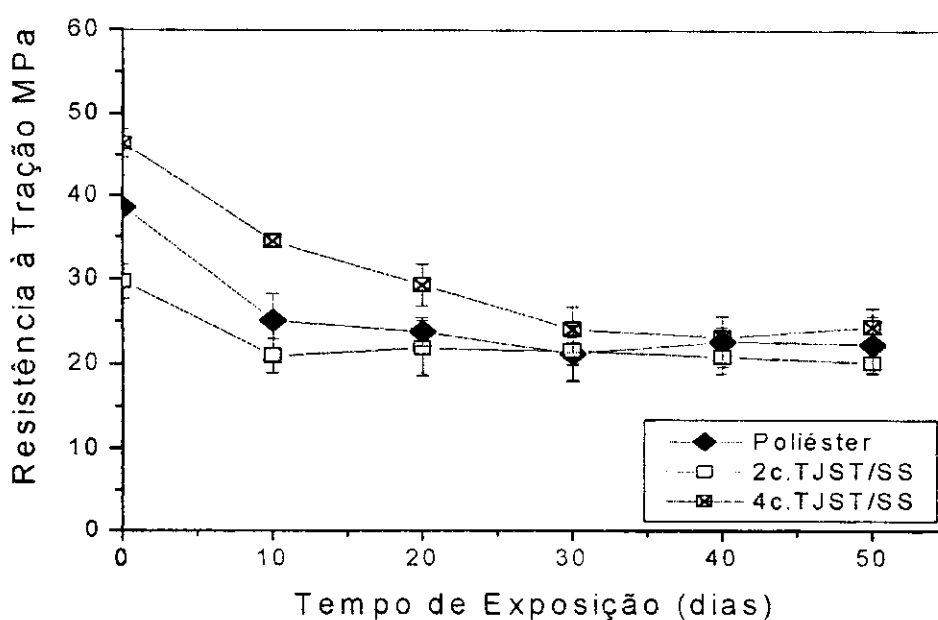


FIGURA 5.10 - Efeito do tempo de exposição térmica na resistência à tração da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão

Na Figura 5.11 observa-se que enquanto os módulos da matriz e dos compósitos com menor teor de fibras tenderam a aumentar com os tempos de exposição, o dos compósitos reforçados por elevados teores de fibras tendem a decrescer com tempos mais longos de exposição.

O aumento inicial no módulo da matriz e dos compósitos em função do tempo de envelhecimento é atribuído à pós-cura da matriz. A sua manutenção em tempos mais longos de exposição é tida como indicativo que a matriz, sob as condições experimentais utilizadas, não sofreu degradação considerável. A tendência à

redução nos módulos dos compósitos com alto teor de fibra em tempos longos de exposição é atribuída à degradação das fibras. Este fato não se manifestaria nos compósitos com baixos teores de fibras porque, nestes casos, as propriedades do compósito seriam dominadas pela matriz.

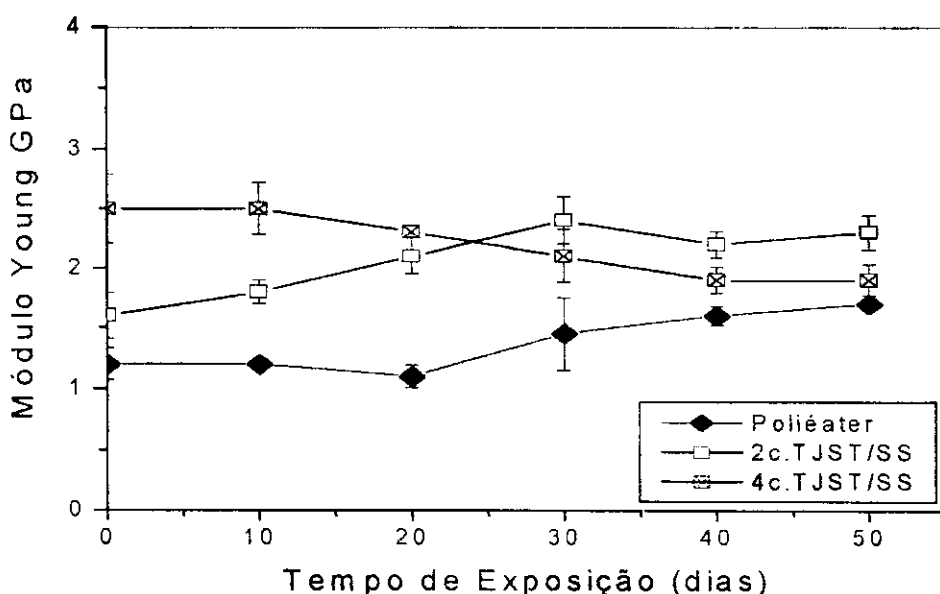


FIGURA 5.11 - Efeito do tempo de exposição térmica no módulo Young da matriz e dos compósitos Poliéster/Tecido de Juta moldados por compressão

Na Figura 5.12 é observado que o alongamento máximo na ruptura da matriz e dos compósitos diminuiu com o tempo de exposição. Os compósitos reforçados por 2 camadas de tecidos de juta bruta, isto é, sem tratamento e sem secagem prévia, sofreram uma redução de 55% nesta propriedade nos 10 primeiros dias de exposição, permanecendo no mesmo patamar para tempos mais longos. O alongamento na ruptura da matriz e dos compósitos com 4 camadas de reforço sofreram reduções mais gradativas. Após 50 dias de exposição tanto a matriz quanto os compósitos sofreram um decréscimo médio de 50% nesta propriedade. Estes resultados são semelhantes e coerentes com os observados para a resistência à tração e módulo discutidos anteriormente. Estudos análogos, conduzidos em sistemas afins, tendo fibras de juta unidirecionais com reforço indicaram que o módulo e o alongamento tiveram comportamentos semelhantes aos observados para sistema reforçado por

tecidos. A redução no alongamento em função do tempo de exposição é atribuída à pós-cura da matriz e/ou à degradação da matriz e das fibras de juta.

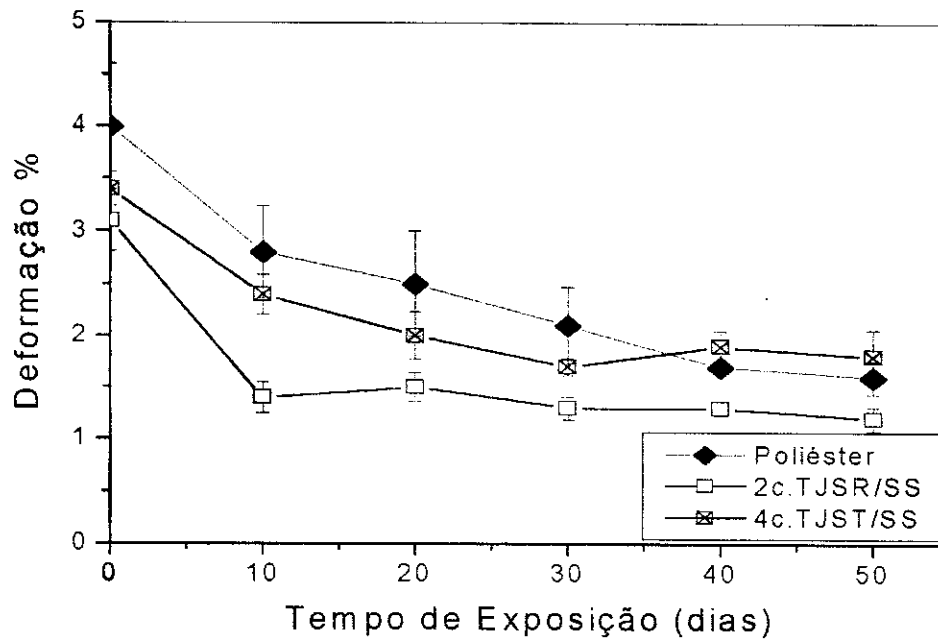


FIGURA 5.12 - Deformação x Tempo de Exposição para compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão e para resina poliéster puro

5.2.2 Efeito dos tratamentos superficiais no comportamento mecânico de compósitos envelhecidos termicamente.

O efeito do tratamento superficial das fibras no comportamento mecânico na tração dos compósitos reforçados por tecidos de juta em função do tempo de exposição térmica são discutidos a seguir.

A Figura 5.13 compara a resistência à tração dos compósitos reforçados por tecidos brutos e por tecidos tratados superficialmente com os pré-polímeros isocianato e uretano, em função do tempo de envelhecimento térmico.

Os resultados indicam que, independente do tratamento superficial utilizado, houve um decréscimo na resistência à tração de todos os compósitos investigados com o tempo de exposição térmica e que, esta redução foi mais acentuada nos primeiros 10 dias de exposição, decrescendo de forma mais amena em tempos mais longos. A resistência à tração dos compósitos em função

do tratamento superficial adotado decresceu na ordem: isocianato>sem tratamento>uretano, isto é, os compósitos reforçados por tecidos tratados com uretano apresentaram propriedades iniciais inferiores e esta diferença foi mantida durante a exposição térmica.

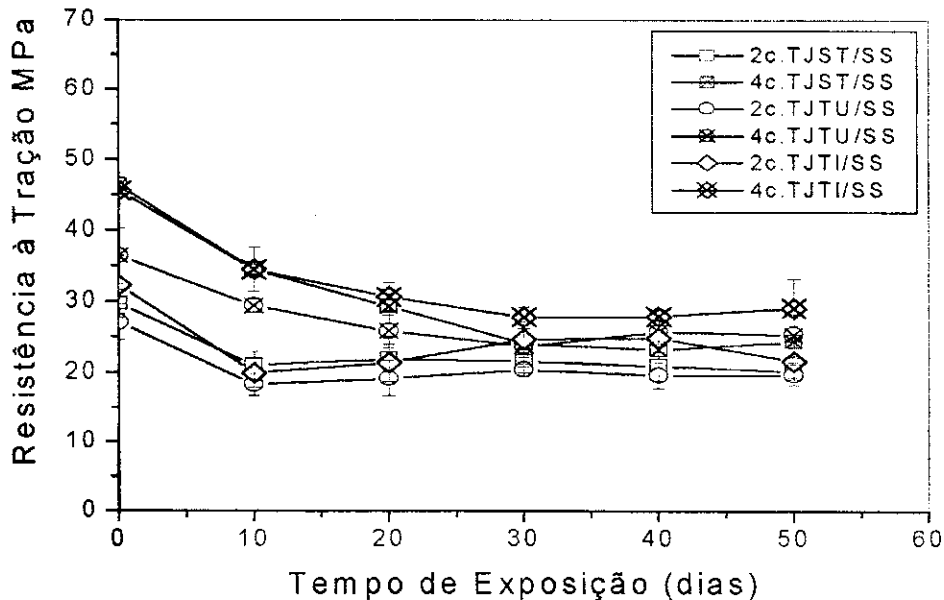


FIGURA 5.13 - Efeito do tratamento superficial das fibras e do tempo de exposição térmica na resistência à tração de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão

Na Figura 5.14 observa-se que o módulo dos compósitos tendeu a aumentar levemente com o tempo de exposição, independente do reforço ter sido modificado superficialmente ou não. Este comportamento já foi reportado para sistemas semelhantes e é atribuído à pós-cura da matriz. Os resultados indicam que, mesmo após 50 dias de exposição a 110°C, a rigidez dos compósitos foi mantida, o que é tido como indicativo que a degradação sofrida não foi extensa. A única exceção apresentada foi para o compósito reforçado por 4 camadas de tecido (51% de fibras) que apresentou um decréscimo no módulo para períodos mais longos de exposição. Este comportamento é atribuído à provável degradação das fibras com o tempo de envelhecimento térmico e que só se manifestaria nos compósitos com elevado teor de fibras. Isto porque, neste caso, a resistência dos compósitos seria dominada pelo reforço e, a teores mais baixos de fibras, a matriz seria o componente dominante. Os resultados evidenciam que os tratamentos superficiais do reforço levaram a compósitos com módulo

levemente inferiores aos apresentados pelos compósitos reforçados por tecidos brutos e que o módulo dos compósitos reforçados por tecidos tratados com uretano foram inferiores aos dos tratados com o pré-polímero isocianato. Isto é atribuído à natureza elastomérica dos modificadores que foram incorporados em teores de 10% sobre o peso das fibras.

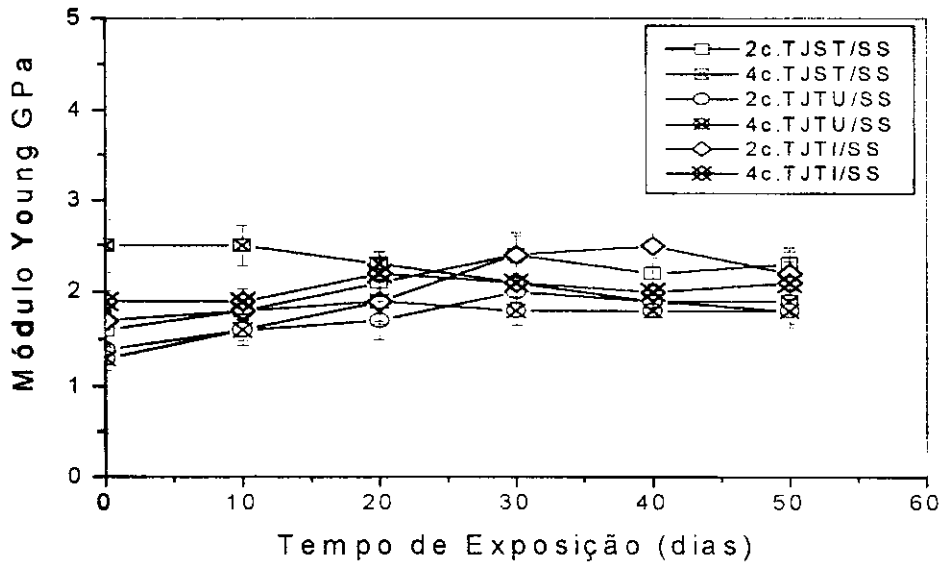


FIGURA 5.14 - Efeito da modificação superficial das fibras e do tempo de exposição térmica no módulo Young de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão

Na Figura 5.15 observa-se que, independente do tratamento superficial utilizado, houve um decréscimo gradativo na deformação de todos os compósitos com o tempo de exposição e que este decréscimo foi mais acentuado nos primeiros 10 dias de exposição. O efeito dos tratamentos superficiais dos reforços foi o de aumentar levemente a elongação na ruptura dos compósitos e este efeito foi mantido durante o envelhecimento térmico. O alongamento na ruptura dos compósitos, em função do tratamento utilizado no reforço, seguiu a ordem:

sem tratamento < isocianato < uretano

Este resultado era o esperado visto que o polímero uretânico empregado tem composição elastomérica e apresenta elongação maior do que a do polímero isocianato utilizado.

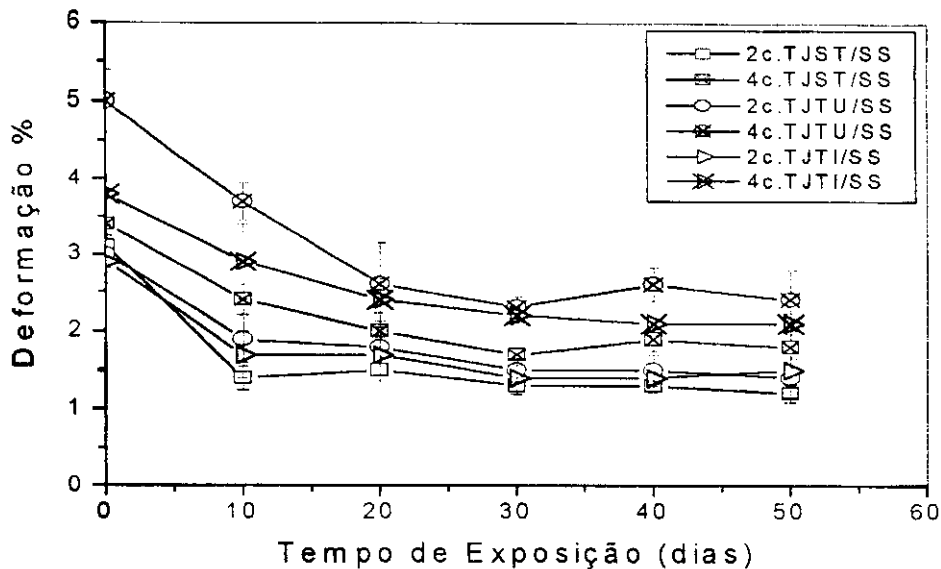


FIGURA 5.15 - Efeito do tratamento superficial das fibras e do tempo de exposição térmica na deformação na ruptura de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão

5.2.3. Efeito da pré-secagem nas propriedades mecânicas dos compósitos envelhecidos termicamente.

Na Figura 5.16 observa-se que a secagem dos tecidos de juta imediatamente antes da laminação dos compósitos levou a um aumento na resistência à tração dos produtos e que este aumento inicial foi mantido com o tempo de exposição. Fica evidenciado que, com a pré-secagem, a resistência do compósito reforçado por 2 camadas de tecido não só passou a ser superior à da matriz, mantendo-se mais alta até 50 dias de exposição, mas chegou a superar os valores do compósito reforçado por 4 camadas de tecido bruto a partir dos 30 dias de exposição térmica. Comportamento análogo foi exibido pelo compósito reforçado por 4 camadas (51% em peso) de tecidos de juta. Os resultados demonstram que a pré-secagem eleva as propriedades dos compósitos, o que foi atribuído à uma melhora na adesão interfacial com a remoção da água adsorvida. Os dados também demonstram que esta melhora inicial se mantém durante a exposição térmica.

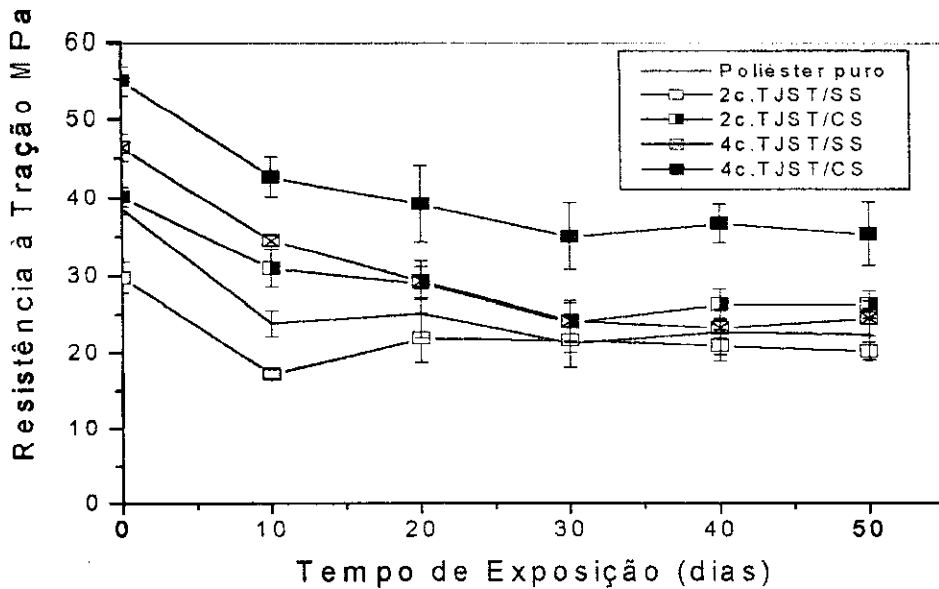


FIGURA 5.16 - Efeito da pré-secagem das fibras e do tempo de exposição na resistência à tração da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão.

Na Figura 5.17 observa-se que os módulos dos compósitos se mantiveram superiores ao da matriz durante todo o tempo de exposição. Para compósitos com tecidos previamente secos os módulos foram superiores aos obtidos com tecidos brutos. Este comportamento é atribuído à melhor adesão interfacial nos compósitos com reforços secos. No caso dos compósitos reforçados por 4 camadas de tecido pré-secos (44% em peso), o módulo elevou-se levemente nos tempos iniciais de exposição, tendendo a permanecer inalterado em tempos mais longos de exposição, enquanto que o módulo dos compósitos com 4 camadas de tecidos brutos (elevado teor de fibras, isto é, 51% em peso) o módulo tendeu a diminuir com o tempo de exposição. Acredita-se que este comportamento esteja associado a uma maior degradação das fibras e/ou deterioração da qualidade de interface devido à presença de umidade.

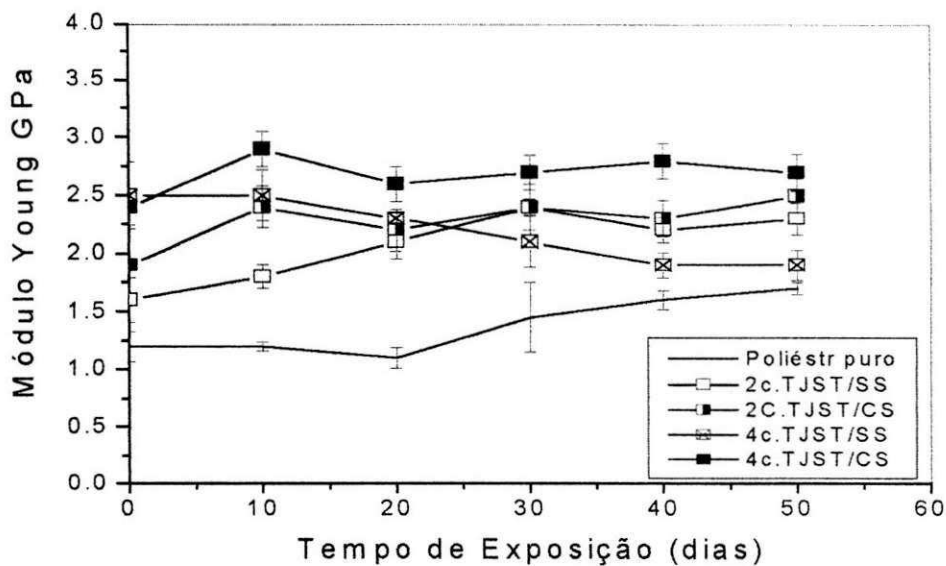


FIGURA 5.17 - Efeito da pré-secagem das fibras e do tempo de exposição térmica no módulo de Young da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão

A Figura 5.18 ilustra o comportamento do alongamento na ruptura da matriz e dos compósitos reforçados por tecidos previamente secos em função do tempo de envelhecimento térmico. Os resultados mostram que a deformação dos compósitos foi inferior à da matriz para todos os períodos de exposição e que a pré-secagem do reforço levou a produtos com uma menor deformação na ruptura. Em todos os casos, a redução no alongamento foi mais acentuada nos primeiros 10 dias de envelhecimento, sofrendo pouca redução adicional em tempos mais longos de exposição.

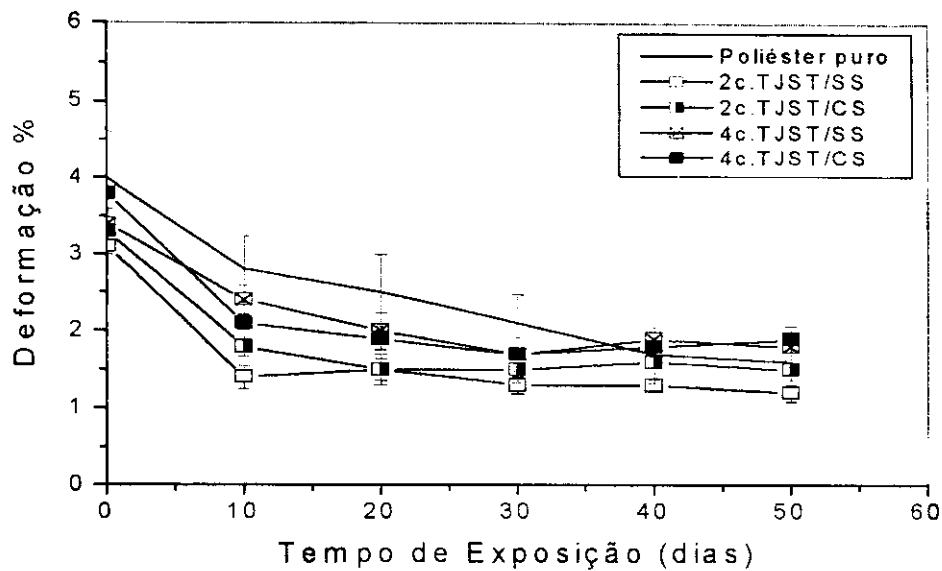


FIGURA 5.18 - Efeito da pré-secagem das fibras e do tempo de exposição térmica na deformação na ruptura da matriz e dos compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão

5.2.4 Efeito dos tratamentos superficiais e da pré-secagem nas propriedades mecânicas de compósitos envelhecidos termicamente.

A Figura 5.19 (a) e (b) ilustram a influência combinada da pré-secagem e dos tratamentos superficiais na resistência à tração na ruptura dos compósitos em função do tempo de envelhecimento térmico. Os resultados mostram que, independente do reforço ter sido superficialmente tratado e previamente seco antes da laminação dos compósitos, houve um decréscimo na resistência à tração, nos 10 primeiros dias de exposição, de 30-40% para compósitos reforçados por 2 camadas de tecidos Figura 5.19 (a) e de 20-30% para compósitos reforçados por 4 camadas de tecidos Figura 5.19 (b). Ficou evidenciado que a pré-secagem dos tecidos tratados proporciona aos compósitos com propriedades superiores e que, a resistência dos compósitos reforçados por tecidos tratados com isocianato foi superior à dos tratados com uretano.

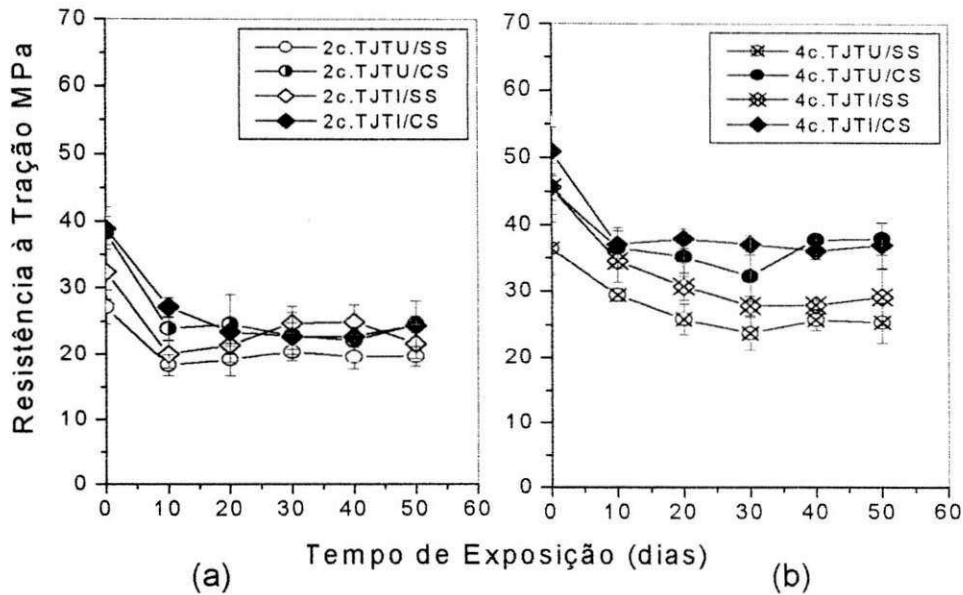


FIGURA 5.19 - Efeito combinado da pré-secagem e tratamento superficial na resistência à tração de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão e envelhecidos térmicamente

As Figuras 5.20(a) e (b) representam os módulos dos compósitos reforçados por tecidos tratados e previamente secos são superiores aos obtidos com tecidos tratados e sem secagem. Este comportamento é atribuído à melhor adesão interfacial nos compósitos com reforços secos. Tanto os compósitos reforçados por 4 camadas de tecidos tratados com uretano como os tratados com isocianato e que foram submetidos à pré-secagem os módulos elevam-se levemente nos tempos iniciais de exposição tendendo a permanecer praticamente inalterados em tempos mais longos de exposição. De modo geral, os módulos dos compósitos tratados com isocianato foram ligeiramente superiores aos dos tratados com uretano o que é atribuído à natureza elastomérica do modificador uretânico.

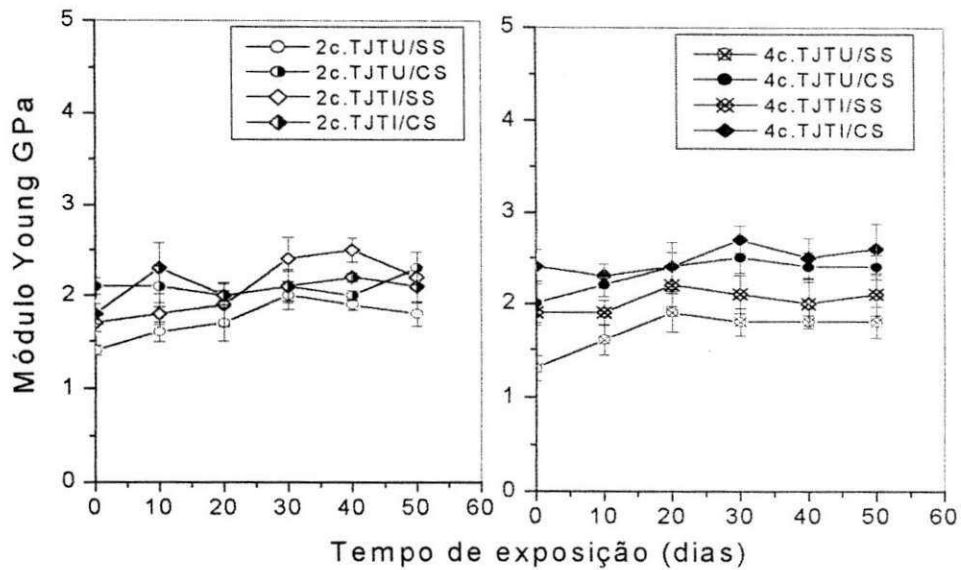


FIGURA 5.20 - Efeito combinado do tratamento superficial e da pré-secagem dos tecidos no módulo Young de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão e expostos termicamente

A Figura 5.21 (a) e (b) representam o alongamento na ruptura de todos os compósitos, independente do tratamento e pré-secagem do reforço, sofreram um decréscimo de 30-40% do valor inicial nos 10 primeiros dias de exposição, e a partir daí sofreram pouca alteração subsequente até os 50 dias de exposição.

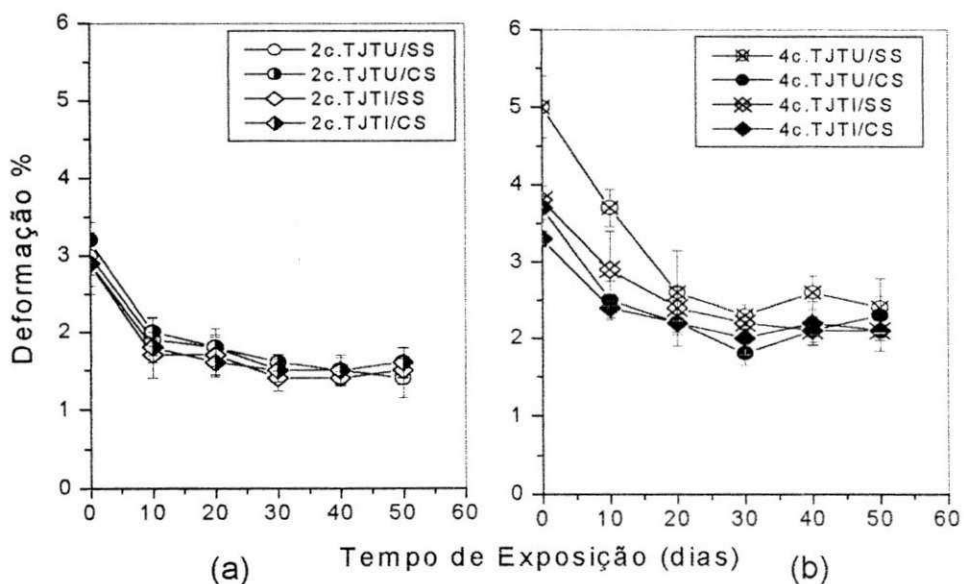


FIGURA 5.21 - Efeito combinado do tratamento superficial e da pré-secagem do reforço na deformação na ruptura de compósitos poliéster/tecido de juta moldados por compressão e envelhecidos termicamente.

A Figura 5.22 compara o efeito do envelhecimento térmico no comportamento mecânico dos compósitos reforçados por tecidos brutos previamente secos com o dos reforçados por tecidos submetidos à combinação de tratamento superficial e pré-secagem.

Os resultados mostram que, apesar do tratamento superficial aliado à pré-secagem ter levado a compósitos com propriedades levemente superiores (maior resistência e módulo e menor alongamento na ruptura) à das exibidas pelos compósitos reforçados por tecidos tratados superficialmente, estas não superaram os valores obtidos para os compósitos reforçados por tecidos brutos pré-secos. Isto mostra que a secagem das fibras foi mais eficaz em promover adesão fibra/matriz do que os tratamentos utilizados. O efeito da secagem e das modificações superficiais nas propriedades dos compósitos seguiu a ordem: sem tratamento>isocianato>uretano.

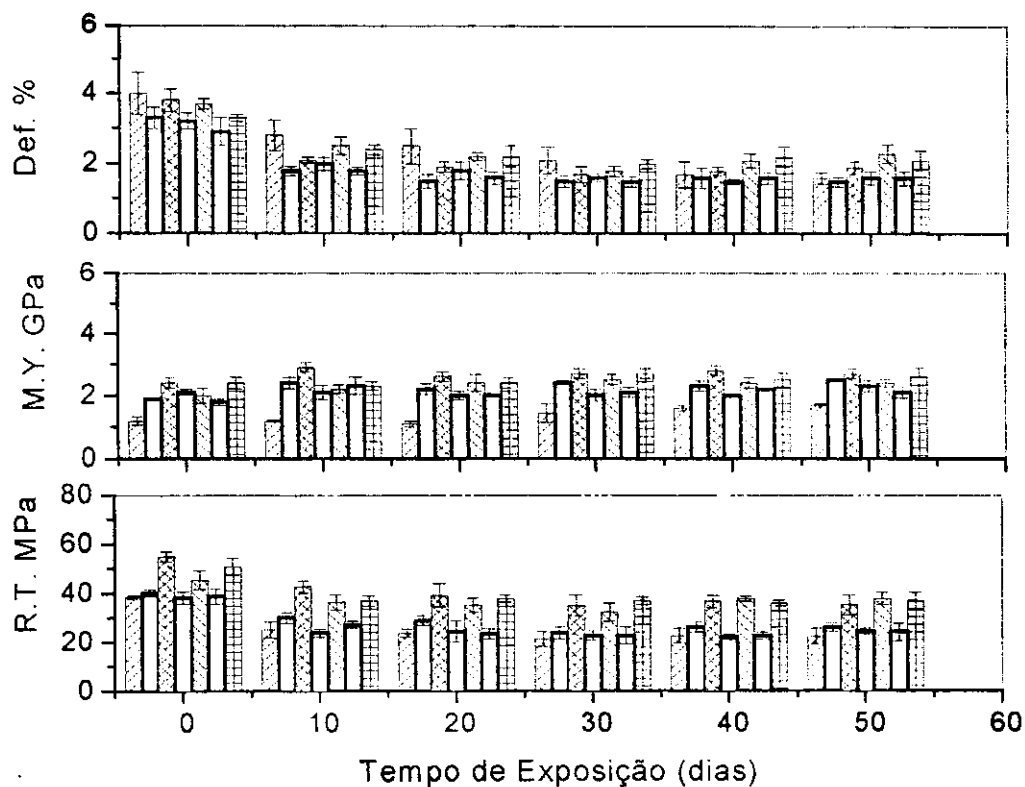


FIGURA 5.22 - Propriedades Mecânicas x Tempo de Exposição para poliéster e compósitos com 2 e 4 camadas de tecidos de juta brutos e tratados com uretano e isocianato submetidos à pré-secagem e ser moldado por compressão.

5.3 - Sorção de Água

5.3.1 Absorção de Água em Compósitos Poliéster/Tecido de Juta

É crescente o interesse no uso de fibras vegetais como reforço em polímeros pois estas fibras são baratas, leves, resistentes, abundantes no País e constituem fonte renovável de matéria-prima. Um dos problemas associado a compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais é a presença de água, que geralmente enfraquece a interação fibra/matriz afetando as suas propriedades mecânicas e podendo acelerar o envelhecimento. Por esse motivo, diversos trabalhos foram publicados sobre capacidade e cinética de absorção de água em compósitos reforçados por fibras vegetais, como por exemplo os estudos sobre as cinéticas de absorção de água em sistemas epóxi/juta (RAO, et al, 1981; GASSAN & BLEDZKI, 1997) e poliéster/juta (RAO et al, 1981; SEMSARZADEH et al, 1984; SEMSARZADEH, 1986).

Na Figura 5.23 estão representadas curvas de absorção de água para amostras de poliéster puro e com compósitos com 2 e 4 camadas de tecido de juta bruta. Os resultados indicam que, enquanto a matriz poliéster chegou a absorver aproximadamente 1% de água, os compósitos reforçados por 2 camadas de tecidos absorveram 12% e os reforçados por 4 camadas absorveram 18% de água. Isto equivale a um acréscimo de 50% na absorção de água com o aumento do teor de fibras de 29% para 51% em peso. Estes resultados são coerentes com os apresentados por RAO (1981) e SENSARZADEH (1984 e 1986) que atribuem o aumento no nível de absorção de água dos compósitos reforçados por fibras vegetais à natureza hidrofílica e à permeabilidade deste tipo de reforço

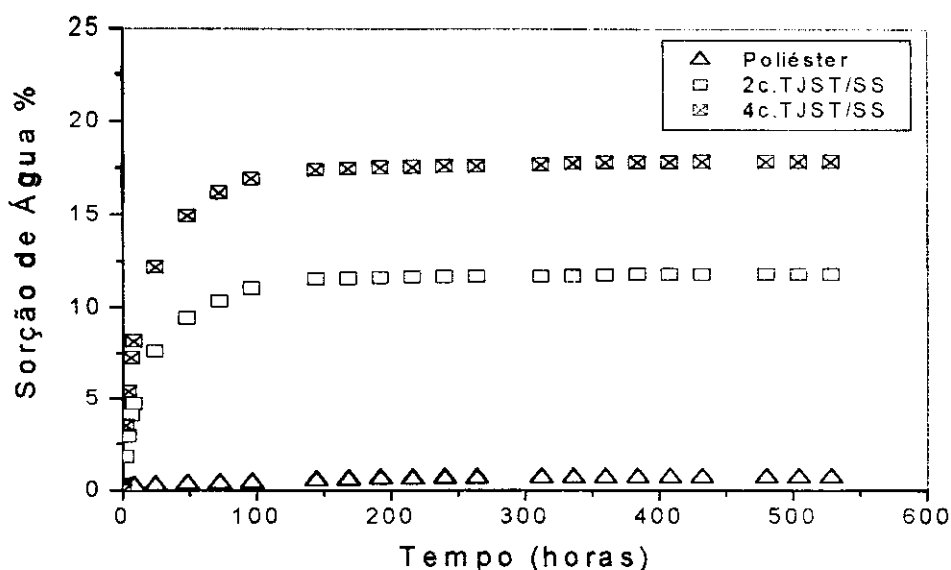


FIGURA 5.23 - Curvas da cinética de sorção de água da matriz poliéster e dos compósitos poliéster/juta reforçados por tecidos brutos

5.3.2 Efeito do Tratamento Superficial dos Tecidos na Absorção de Água dos Compósitos

A Figura 5.24 compara o efeito dos tratamentos superficiais do reforço na cinética de sorção de água dos compósitos reforçados por tecidos brutos e por tecidos tratados superficialmente.

Os resultados mostram que, para todos os compósitos, a absorção de água é rápida nos estágios iniciais (primeiras 50h), diminuindo e tendendo ao equilíbrio em tempos mais longos (150-200h) de exposição. Ficou evidenciado que, para os compósitos reforçados por 2 camadas de tecidos, os tratamentos superficiais dos tecidos fizeram com que a cinética de sorção de água fosse retardada, mesmo se o teor de água absorvida em tempos longos fosse equivalente para todos os compósitos, ou seja, fosse independente do tratamento superficial empregado. O comportamento dos compósitos reforçados por 4 camadas de tecidos foi um pouco distinto. Os resultados indicam que os tratamentos superficiais dos tecidos não alteraram o tempo necessário para que o equilíbrio de sorção, porém o tratamento com isocianato levou a compósitos com menor sorção de água no equilíbrio do que os não tratados. Os compósitos reforçados por tecidos tratados com uretano apresentaram maior sorção levemente superior aos demais. Os

motivos para a pequena discrepância no comportamento de sorção de água observado em função do teor de fibras não é claro. Os resultados indicam, contudo, que pelo menos o tratamento superficial dos tecidos com o pré-polímero isocianato, levou a uma menor absorção de água pelos compósitos, o que é tido como indicativo que houve uma redução nos grupos hidroxila disponíveis na superfície das fibras, ou seja, que houve reação entre os grupos isocianato do modificador e os grupos hidroxila da celulose que constitui as fibras de juta, reduzindo portanto a sorção de água.

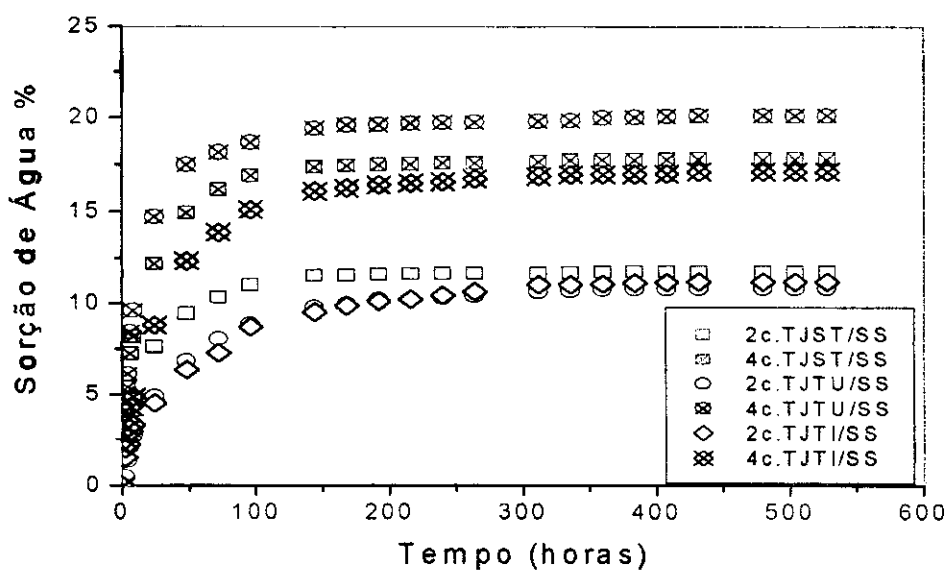


FIGURA 5.24 - Efeito do tratamento superficial dos tecidos na cinética de sorção de água de compósitos poliéster/juta

5.3.3 Efeito da Pré-Secagem dos Tecidos na Absorção de Água dos Compósitos

A Figura 5.25 ilustra o efeito da secagem dos tecidos imediatamente antes da laminação na cinética de sorção de água dos compósitos. Observa-se que a afinidade pela água diminuiu significativamente (34 e 18 % para 2 e 4 camadas respectivamente) com a pré-secagem do reforço, o que é interpretado como sendo devido a uma adesão fibra-matriz mais forte, promovida pela pré-secagem do reforço, reduzindo a sorção de água pelos compósitos. Os resultados de resistência mecânica são coerentes com esta interpretação pois houve melhora

evidente nas propriedades dos compósitos cujos reforços foram previamente secos.

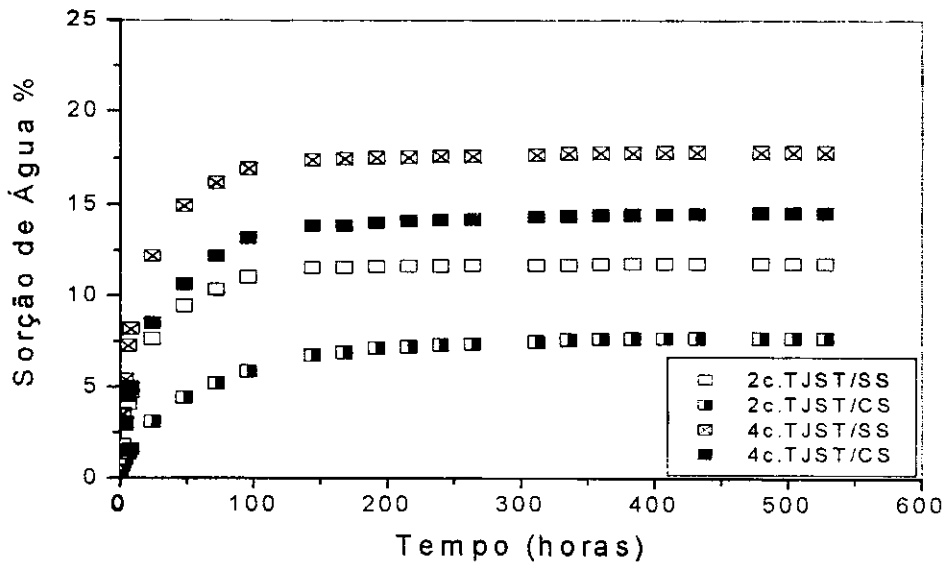


FIGURA 5.25 - Efeito da pré-secagem dos tecidos na cinética de sorção de água de compósitos poliéster/juta.

5.3.4 Efeito Combinado da Pré-Secagem e Tratamento Superficial dos Tecidos na Absorção de Água dos Compósitos

A Figura 5.26 compara as curvas cinéticas de absorção de água dos compósitos reforçados por tecidos tratados superficialmente e submetidos à pré-secagem com as de compósitos equivalentes cujos tecidos não foram previamente secos. Os resultados mostram que a pré-secagem reduz significativamente a capacidade de sorção de água e que, o tratamento com isocianato associado a pré-secagem foi o mais eficiente. Os dados demonstram que o efeito do tratamento e da secagem do reforço na afinidade pela água dos compósitos ocorre na ordem:

uretano > sem tratamento > isocianato.

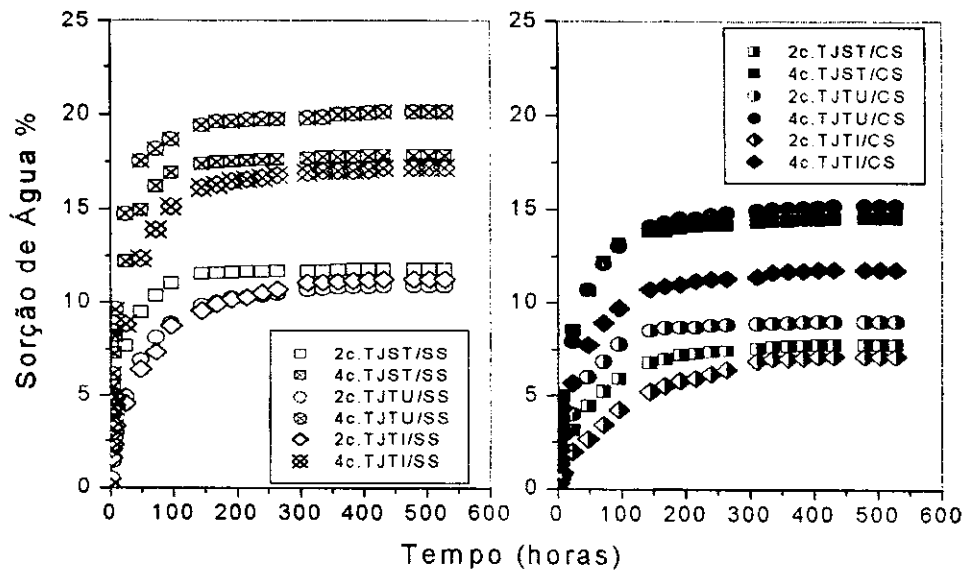


FIGURA 5.26 - Efeito da ação combinada de tratamento superficial e pré-secagem do reforço na cinética de sorção de água de compósitos poliéster/juta.

Para uma melhor compreensão dos efeitos dos tratamentos e da presença de tecidos de juta sobre a capacidade de sorção de água, na Figura 5.27 estão representados os valores de teor de água no equilíbrio, obtidos experimentalmente, em função do teor de fibras. Como esperado, devido à maior afinidade pela água do material celulósico, a capacidade de absorção de água aumenta com o teor de juta. A Figura 5.27 mostra que a absorção de água que é aproximadamente 1% na resina, aumenta até valores que podem alcançar 20% nos compósitos contendo elevada proporção de tecido de juta (50% em peso de fibras). Também em todos os casos, a pré-secagem teve efeito favorável, diminuindo a capacidade de absorção de água pelo compósito, o que é atribuído a uma melhor adesão fibra/matriz pois, numa interface fraca, há separação física entre o reforço e a matriz, o que facilita e promove a absorção e difusão de água no compósito.

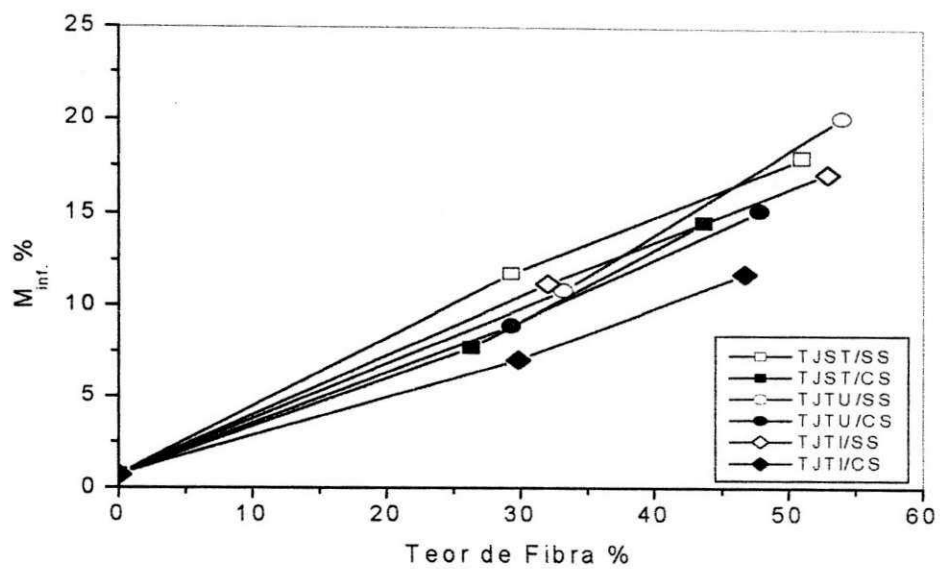


FIGURA 5.27 - Efeito do teor de fibras, tratamentos superficiais e pré-secagem do reforço na absorção de água no equilíbrio de compósitos poliéster/juta

MODELAGEM

Para interpretar as curvas cinéticas de absorção de água e os mecanismos envolvidos, foi utilizado um modelo difusional Fickiano simplificado com coeficiente de difusão efetivo constante e condição de equilíbrio na superfície. Considerando a geometria das amostras e que as bordas foram seladas, foi ainda proposto no modelo a hipótese de transferência unidimensional, e comportamento de placa plana infinita. A absorção de água foi descrita pela 2ª lei de Fick.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\text{com condição inicial: } C_A(x, 0) = 0 \quad (2)$$

$$\text{e de contorno } C_A(\pm b/2, t) = C_{A\infty} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_A(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (3A)$$

a equação (1) admite a solução (Crank, 1975)

$$M^* = 1 - \frac{\bar{C}_A}{C_{A\infty}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{l^2}\right) \quad (4)$$

A equação (4) tem uma aproximação assintótica para tempos curtos muito utilizada na literatura sobre difusão em polímeros (NEOGI, 1996):

$$\frac{M_t}{M_{\infty}} = \frac{8}{\pi^{1/2}} \left(\frac{Dt}{l^2}\right)^{1/2} \quad (5)$$

Para tempos longos, a série infinita na equação (4) converge rapidamente e apenas o primeiro termo pode ser utilizado com uma boa aproximação.

As duas soluções assintóticas foram utilizadas e o coeficiente de difusão efetivo estimado mediante ajuste de regressão dos dados experimentais, para tempos curtos e tempos longos. Foi observado que a solução para tempos curtos ajusta-se adequadamente aos pontos obtidos até aproximadamente 25 horas. A partir desse tempo, a solução utilizando o primeiro termo da série da equação (4), mostrou-se satisfatória.

As Figuras 5.28 (a) e (b) ilustram a adequação do modelo utilizado às curvas cinéticas obtidas pelos compósitos com tecido de juta submetidos à pré-secagem. Em todos os casos os coeficientes de correlação foram superiores a 0,99 (Tabela anexo)

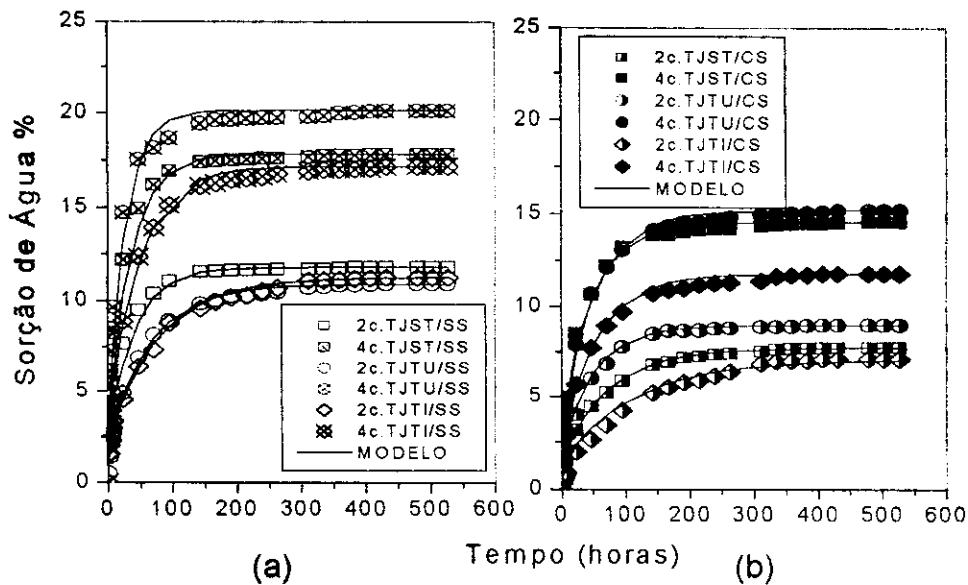


FIGURA 5.28 - Curvas de cinética de absorção de água com ajuste do modelo para compósitos poliéster/juta em função do teor de fibras, tratamento superficial e pré-secagem do reforço

Nas Figuras 5.29 e 5.30 estão representados os valores dos coeficientes de difusão obtidos a partir do ajuste ao modelo para tempos curtos e longos respectivamente. No caso dos tempos longos, a tendência observada coincide com o esperado, ou seja, a presença de tecido em proporção elevada

provoca um aumento do coeficiente de difusão de água efetivo no compósito. Isto é evidente, já que o tecido por sua natureza porosa, introduz uma maior proporção de volume livre. No caso dos tempos curtos, a penetração de água que, no modelo utilizado, supõe-se que seja unidirecional, não terá atingido ainda a região ocupada pelo tecido, apresentando então, valores próximos àquele da resina. Assume-se que o fato destes valores serem um pouco menores, bem como a presença de um mínimo para compósitos com aproximadamente 30% de tecido de juta possa estar relacionada a diferentes estados de cura da matriz, o que afetaria o volume livre. Estes diferentes estados de cura estariam associados a uma dissipação de calor deficiente a elevados teores de fibras, o que seria função das propriedades térmicas do tecido. O efeito dos diferentes tratamentos sobre o coeficiente de difusão efetivo também pode ser analisado. Os menores coeficientes de difusão efetivo e, portanto, a menor taxa de sorção de água, foram obtidos para compósitos reforçados por tecidos tratados com isocianato e previamente secos antes da laminação.

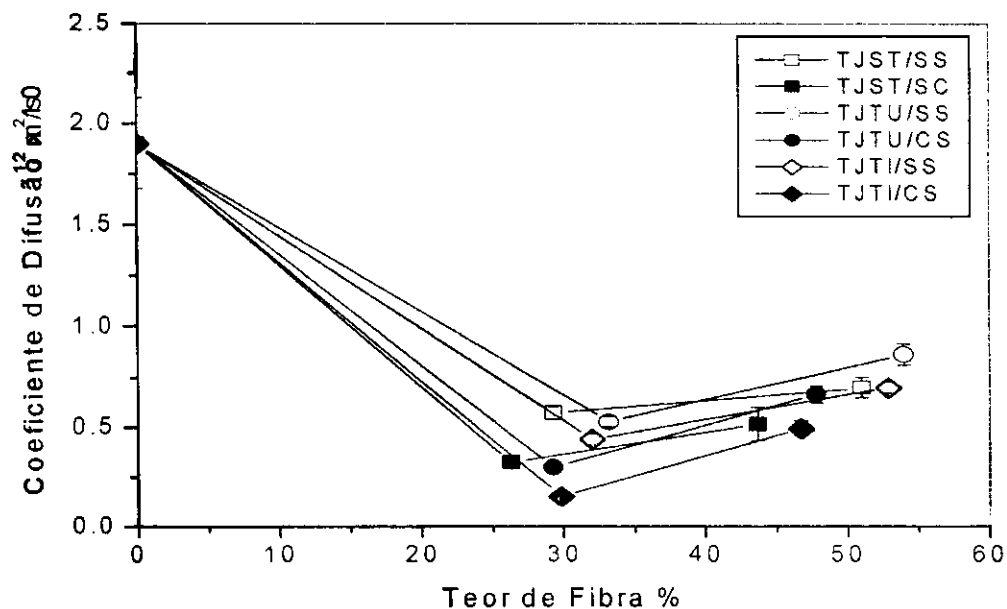


FIGURA 5.29 - Coeficiente de difusão em função do teor de fibras. Solução assintótica para tempos curtos.

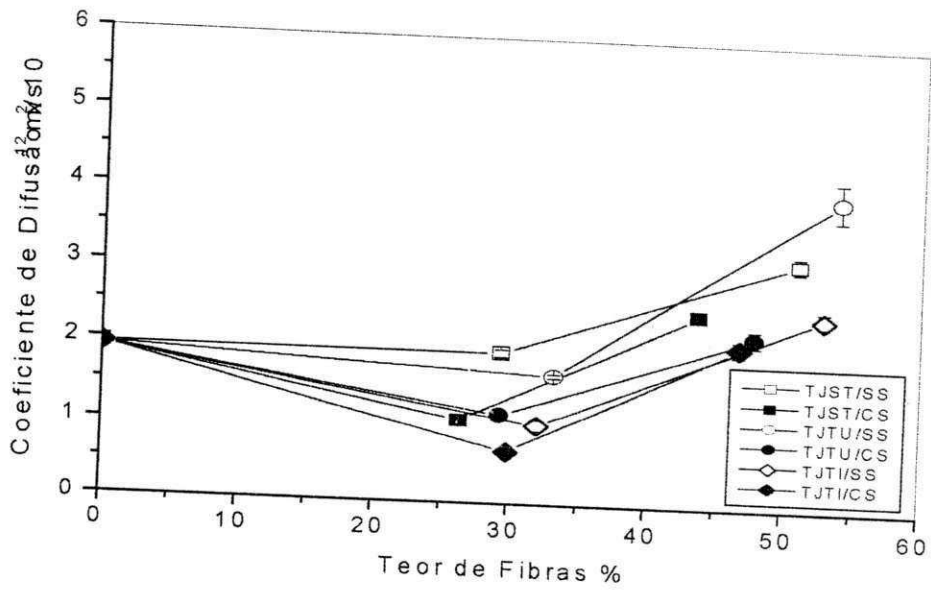


FIGURA 30 - Coeficiente de Difusão x do Teor de Fibras. Solução Assintótica para tempos longos

CAPÍTULO VI

6.0 CONCLUSÕES

Os estudos realizados no presente trabalho, mostraram resultados importantes do tipo:

- a resistência à tração dos compósitos reforçados por tecidos de juta aumenta com o teor de fibras, sendo 25% inferior à da matriz a teores moderados (29%) de fibras e 20% superior à da matriz a teores elevados (50%) de fibras,
- a resistência à tração da matriz e dos compósitos sofreram um decréscimo considerável nos 10 primeiros dias de exposição térmica, permanecendo praticamente inalterados para tempos de exposição mais longos;
- A secagem prévia das fibras provou ser método eficaz para promover a adesão fibra/matriz elevando assim as propriedades mecânicas dos compósitos investigados de maneira rápida, viável e econômica;
- apesar do tratamento superficial dos tecidos com o pré-polímero isocianato ter levado a um leve aumento na resistência e módulo dos compósitos, este não superou o alcançado com a secagem prévia do reforço;
- melhores propriedades mecânicas sob tração foram obtidas quando o tratamento superficial do reforço com isocianato foi aliado à secagem prévia dos tecidos porém, a relação custo/benefício não justifica o emprego desta dupla ação, favorecendo muito mais fortemente a pré-secagem do reforço;
- a absorção de água aumentou com o teor de fibras nos compósitos;
- a pré-secagem dos tecidos antes da laminação elevou a resistência à absorção de água dos compósitos;

- menores coeficientes de difusão efetiva e, portanto, a menor taxa de sorção de água foi obtida para os compósitos reforçados por tecidos tratados com isocianato e previamente secos;
- a cinética de sorção foi adequadamente descrita por um modelo difusional aplicado à todas as curvas cinéticas obtidas.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar propriedades de compósitos com outras matrizes termofixas e termoplásticas reforçadas por tecidos a base de fibras vegetais com a finalidade de no futuro produzir ou sugerir produtos;
- Realizar ensaios de flexão e impacto;
- Estudar com auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura, a interface do compósito, para se conhecer melhor o mecanismo de adesão;
- Realizar ensaios de delaminação
- Estudar o comportamento dos compósitos envelhecidos termicamente para tempos mais longos de exposição (> que 50 dias);
- Estudar o comportamento do poliéster quando submetidos a outras temperaturas;
- Avaliar o efeito de diferentes condições de secagem dos tecidos nas propriedades finais dos compósitos;
- Desenvolver tecidos com outras arquiteturas de trama para determinar o seu efeito nas propriedades mecânicas dos compósitos.

CAPÍTULO VIII

6.0 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ASTM- Anual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988.
- ADDABO, H. E.; ROJAS, A. J. & WILLIAMS, R. J. J., Polymer engineering and science, **19**, 835, (1979).
- 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).
- 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).
- BATISTA, W. W.; CARVALHO, L. H.; ALSINA, L. S.; ROCHA, A. P. T., Efeito das condições de pré-secagem nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster Juta. Anais do IV Congresso Brasileiro de polímeros, pp 161-162, Salvador-BA. (1997).
- BELGACEM, M. N.; BATAILLE, P. & SAPIEHA, P., Journa Applied Polymer Science, **53**: 379-365, (1994).
- BHARDURI, S. K.; MATHEW, M. D.; DAY, A. & PANDEY, S. N., Thermal-behavior of jute fibre and its components. 1. dsc studies, cellulose chemistry and technology, vol. 4, No. 28, (1994A).

- BHARDURI, S. K.; MATHEW, M. D.; DAY, A. & PANDEY, S. N., Thermal-behavior of jute fibre and its components. 1. thermogravimetric studies, Cellulose Chemistry and Technology, vol. 6, No. 28, (1994B).
- BLASS, A., Processamento de Polímeros, 2ª ed., Editora da UFSC, (1988).
- BLEDZKI, A. K. & GASSAN, J., Composites reinforced with cellulose based fibres, Progress in Polymer Science, 24: 221-274, (1999).
- BLEDZKI, A. K.; REIHMANE, S. & GASSAN, J., Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites, Journal Applied Polymer Science, **59**: 1329-1336, (1996).
- CARVALHO, L. H., Chemical modification of fibers for plastics reinforcement in composites, First International Lignocellulosics Plastics Composites, São Paulo, (1996).
- CARVALHO, L. H. & BATISTA, W. W., Propriedades mecânicas de compósitos poliéster-juta. Efeito de tratamento superficiais no reforço. Anais do 3º Congresso Brasileiro de Polímeros, Vol. 2, 892, (1995).
- CARVALHO, L. H.; BATISTA, W. W.; D'ALMEIDA, J. R. M., Propriedades mecânicas de compósitos poliéster/juta. efeito da tenacificação da matriz.. Anais do IV Congresso Brasileiro de Polímeros, pp 157-158, Salvador-BA, (1997a).
- CARVALHO, L. H.; BATISTA, W. W.; SOUSA, N. A., Influência do tipo de poliéster e de modificação alcalina nas propriedades tênses de compósitos poliéster/juta. Anais do IV Congresso Brasileiro de polímeros, pp 163-164, Salvador – BA, (1997b).
- CARVALHO, L. H., Envelhecimento de compósitos poliéster/juta pultrusados, Projeto de Iniciação Científica, UFPB/ CCT/ DeMA, (1998).

- CARVALHO, L. H.; JOSEPH, K.; NÓBREGA, M. M. S., Reforços híbridos em compósitos poliéster/fibras vegetais. In: SIMPOSIO ARGENTINO DE POLÍMEROS, Cordoba, 1999. Anais. Cordoba-Argentina, p. 67-71, (1999).
- CLARK, R. A. & ANSELL, M. P., Jute and glass fibre hybrid laminates, Journal of Materials Science, **21**, 269 – 276, (1986).
- CHAWLA, K. K. & BOSTOS, A. C, in Proceedings of Third International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Pergamon Press. Cambridge, Vol. 3, p. 191 (1979).
- CORBAN, BERNARD, P., Textiles: Fibre to Fabric, 5th edition, McGraw-Hill Book Company, New York, (1975).
- COSTA, R., Compósitos poliéster/juta: efeitos de modificação químicas no reforço e na matriz poliéster, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campina Grande-PB, (1997).
- CRANK, J., The mathematics of diffusion, pg. 44, (1975).
- D'ALMEIDA, J. R. M., Propriedades mecânicas de fibras de juta, Ciência e Cultura, 39, 1025-1032, (1987).
- D'ALMEIDA, J. R. M.; BOYNARD, C. A.; CARVALHO, L. H., Avaliação da adição da mistura isocianato/poliol sobre as propriedades mecânicas de uma resina poliéster. Anais do IV Congresso Brasileiro de polímeros, pp 219-220, Salvador, BA, (1997).
- DENG, S.; YE, L.; MAY, Y. W.; LIU, H. Y., Evuluation of fibre strengnt and fiber/matrix adhesion using single fibre fragmentation Test, Composites, vol. 29^A, Part A, (1998).

- DASH, B. N.; RANA, A. K.; MISHRA, H. K.; NAVAK, S. K.; MISHRA, S. C.; TRIPATHY, S. S., Novel, low-cost jute-polyester composites. part 1: processing mechanical properties, and sem analysis, Polymer Composites, **20**, 62-71, (1999).

- FELIX, J. M. & GATENHOLM, P., Journal Applied Polymer Science, **42**: 609-620, (1991).

- FLINN, R. & TROJAN, P., Engineering materials and their applications, Houghton Mifflin Company, Boston, (1981).

- GANGULY, P. K., Chemical modification of jute for improved fiber proprieties and suitability as reinforcement for resin based composites, Ph.D, Thesis, University of Calcutta, (1992).

- GASSAN, J. & BLEDZKI, A. K., Polymer Composites, **18**(2): 179-184, (1997).

- GASSAN, J. & BLEDZKI, A. K., Alkali treatment of jute fibers: relationship between struture and mechanical properties, Journal Applied Polymer Science, **71**, 623-629, (1999).

- GEBNER, W., Chemiefasern/Textilind (Ind-Text), **39**, 91 (7/8): 185-187, (1989).

- GHOSH, P. & GANGULY, P. K., Jute fiber-reinforced polyester resin composites effect of different types and degrees of chemical modification of performance of the composites, Plastics Rubber and Composites Procssing and Applications, **20**(3), 171, (1993).

- GHOSH, P. & GANGULY, P. K., Poliacrylonitrile (pan)- grafted jute fibers: some physical and chemical properties and morphology, Journal of Applied Polymer Science, **52**, 77-84, (1994).

- GHOSH, P.; SAMANTA, A. K. & DEV, D., Simultaneous free radical polymerization and acidic polycondensation of acrylamide-formaldehyde resin in jute fabric, Journal Applied Polymer Science, **64**: 2473-2489, (1997).

- GHOSH, P.; DEV, D. & SAMANTA, A. K., Effect of Graft Copolymerization of Mixtures of Acrylamide and Methyl Methacrylate on Mechanical Properties of Jute Fibers of Different Compositions, Journal Applied Polymer Science, **68**, 1139-1147, (1998).

- GOWDA, T.; M., NAIDU, A. C. B. & CHHAYA, R., Some Mechanical properties of Untreated Jute Fabric-Reinforced Polyester Composites, Composites Part A- Applied Science and Manufacturing, **30**, 277-248, (1999).

- HAGE, Jr. E.; Compósitos e Blendas Poliméricas, Campinas, Instituto Latino Americano e IBM, (1989).

- HUA, L.; ZADORECKI, P. & FLODIN, P. ,Polymer Composite, **8**(3): 199-202, (1987).

- HUA, L.; FLODIN, P; RONNHULT, T., Polymer Composite, **8**(3): 203-207, (1987).

- IDRIS ALI, K. M.; UDDIN, M. K.; BHUTYAN, M. I. U. & KHAN, M. A., Improvement of jute Fiber Through Ultraviolet-cured Film of Uretane Acrylate, Journal of Applied Polymer Science, **54**, 303-308, (1994).

- ISORCA, INC., Introduction to Resin Transfer Moulding, Society of Plastics Industry, Composites Institute, (1992).

- KHAN, F. & AHMAD, S. R., Graft Copolymerization of Water-Emulsified Methyl Methacrylate with Preirradiated Jute Fiber, Journal of Applied Polymer Science, **65**, 456-468, (1997).

- KROSCWITZ, J.I., Polymers: Fibres and Textiles. New York: Willey. (1990).

- JOSEPH, K. & CARVALHO, L. H., Tensile Properties of Jute – Cotton Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites, Brazilian Polymer Conference, 1999.

- JOSEPH, K. & CARVALHO, L. H., Propriedades de compósitos poliéster insaturado/tecido híbrido de juta-algodão. In. 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. Águas de Lindóia, Anais. São Paulo, ABPol, p. 834-839, 1999b.

- MALDAS, D.; KOKTA, B. V. & DANEULF, C., Influence of coupling agents and treatments on the mechanical-properties of cellulose fiber-polystyrene composites, Journal of Applied Polymer Science, **37**:751-775, (1989).

- MEDEIROS, E. S. & CARVALHO, L. H., Efeito do Envelhecimento Térmico nas Propriedades Tênséis de Compósitos Poliéster/Juta Pultrusados, In. 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. Águas de Lindóia, Anais. São Paulo, ABPol, 724-725, (1999).

- MITRA, B. C.; BASAK, B. C. & SARKAR, M., Studies on Jute-Reinforced Composites, Its Limitations, and Some Solutions Through Chemical Modifications of Fibers, Journal Applied Polymer Science, **67**, 1093-1100, (1998).

- MOHANTY, A. K. & MISRA, M., Studies on jute composites- A literature review, Polym. Plast. Technol. Eng., **34**(5), 729-792 (1995).

- MOHANTY, E. & SINGH B. C., Graft Copolymerization of Methylmetacrylate onto Jute Fiber Initiated by Cerium (IV)- DMSO Redox Initiator System, Journal Applied Polymer Science, **69**, 2569-2576, (1998).

- NEOGI, P., Diffusion in Polymers, pg. 175,

- NÓBREGA, M. M. S., Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Tecidos Híbridos Juta/Vidro, Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, (2000).

- PAL, P. K., Jute Reinforced Plastics: A Low Cost Composite Material, Plastics and Rubber Processing and Applications, **4**, 215-219, (1984).

- PAWOCK, M. A., ANTEC/92, 2146, (1984).

- PROQUINOR- Boletim Técnico. Publicação Interna. São Paulo, 1996.

- RAJ, R. G.; KOKTA, B. V.; DEMBELE, F. & SANSCHAGRAIN, B. J., Compounding of cellulose fibers with polypropylene-effect of fiber treatment on dispersion in the polymer matrix Journal Applied Polymer Science **38**, (11) 1987-1996 (1989)

- RAO, R. M. V. G. K.; BALASUBRAMANIAN, N. and CHANDA, M., Moisture absorption phenomenon in permeable fiber polymer composites, Journal Applied Polymer Science, **26**, 4069-4079 (1981).

- RESANA S/A Divisão de resinas para compostos reforçados. RESAPOL 10-225. Boletim Técnico –São Paulo, 1997.

- RICHARDSON, H., Polymer Engineering Composites, Applied Science Publishers, London, (1997).

- ROWELL, R. M.; SANADI, A. R.; CAULFIELD, D. F. & JACOBSON, R. E., Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. First International Lignocellulosics Plastics Composites, São Paulo, (1996).

- SANTOS, M. A.; COSTA, R. & CARVALHO, L. H., Compósito Poliéster-Juta: O Efeito do Tratamento Superficial do Reforço e de Modificação da Matriz

nas Propriedades Mecânicas, In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA, Anais, Santiago-Chile, v.1, (1999).

- SAHA, A K.; DAS, S.; BHATTA, D. et al., Study of Fiber-Reinforced Polyester composites by Dynamic Mechanical Analysis, Journal Applied Polymer Science, **71**, 1505-1513, (1999).
- SAHA, A. K. & MITRA, B. C., Studies on Cyanoethylation of Jute Fiber, Journal Applied Polymer Science, **62**, 733-742 (1996).
- SHAH, A. N. & LAKKAD, S. C., Mechanical Properties of Jute-Reinforced Plastics, Fibre Science and Tecnology, **15**, 41-46, (1981).
- SEMSARZADEH, M. A.; LOTFALI, A. R. & MIZADEH, H., Polymer Composite, **5(2)** 2141-2142, (1984).
- SEMSARZADEH, M. A. & AMIRI, D., Binder for Jute-Reinforced Unsaturated Polyester Resin, Polymer Engineering and Science, **25**, 618-619, (1985).
- SEMSARZADEH, M. A., Polymer Composite, **7(2)**: 23-25, (1986).
- SIKDAR, B.; BASAR, R. K. & MITRA, B. C., Studies on Graft copolymerization of Acrylonitrile onto Jute Fiber with Permanganate Ion Inicitation System in Presence of Air, Journal Applied Polymer Science, **55**, 1673-1682, (1995).
- SRIDHAR, M. K.; BASAVARAPPA, G.; KASTURI, S.G & ASUBRAMANIAN, N., Mechanical Properties of Jute-Poliéster Composites, Indian Journal of Tecnology, **22**, 213 – 215, (1984)
- SONI, R. P. & SONI, M., Studies on Natural Fibre Reinforced Phenolic Composites, Journal of Scientific & Industrial Research, **58**, 34-36, (1999).
- UGBOLUE, S. C.D., Text. Inst., **20(4)**: 41-43, (1990).

- VERDU, J., Effect of Ageing on the Mechanical Properties of Polymeric Materials, J.M.S.-Pure Applied Chemistry, vol. **A3**, No. 10, (1994).
- WHITE, R. J. & DE, S. K.; Short-Fibre Polymer Composites, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, (1996).
- WILLIAN, R. J. J., ROJAS, A. J.; MARCIANO, J. H.; RUZZO, M. M. & HACK, H. G., Polymer Plastic Technology Engineering, Vol. **24**, (1985).
- WOLLERDORFER, M. & BADER, H., Influence of Natural Fibers Properties of Biodegradable Polymers, Industrial Crops and Products, **8**, 105-112, (1998).

ANEXO A

Propriedades Mecânicas sob Tração

Tabela A.1. Resistência à Tração de Compósitos poliéster/tecido de juta

Camadas	TJST/SS	$\pm \sigma$	TJTU/SS	$\pm \sigma$	TJTI/SS	$\pm \sigma$
0	38,6	0,8	38,6	0,8	38,6	0,8
2	29,7	2	27,1	2,5	32,3	4,1
4	46,4	1,7	36,4	4	45,6	2

Camadas	TJST/CS	$\pm \sigma$	TJTU/CS	$\pm \sigma$	TJTI/CS	$\pm \sigma$
0	38,6	0,8	38,6	0,8	38,6	0,8
2	40,1	1,3	38,2	2,5	38,9	3,2
4	55,0	2,1	45,4	3,8	50,9	3,6

Tabela A. 2. Módulo Young de Compósitos poliéster/tecido de juta

Camadas	TJST/SS	$\pm \sigma$	TJTU/SS	$\pm \sigma$	TJTI/SS	$\pm \sigma$
0	1,2	0,13	1,2	0,13	1,2	0,13
2	1,6	0,19	1,4	0,05	1,7	0,1
4	2,5	0,29	1,3	0,09	1,9	0,11

Camadas	TJST/CS	$\pm \sigma$	TJTU/CS	$\pm \sigma$	TJTI/CS	$\pm \sigma$
0	1,2	0,13	1,2	0,13	1,2	0,13
2	1,9	0,05	2,1	0,09	1,8	0,11
4	2,4	0,16	2	0,24	2,4	0,19

Tabela A.3. Deformação de Compósitos Poliéster/Tecido de Juta

Camadas	TJST/SS	$\pm \sigma$	TJTU/SS	$\pm \sigma$	TJTI/SS	$\pm \sigma$
0	4	0,6	4	0,6	4	0,6
2	3,1	0,29	3	0,25	2,9	0,3
4	3,4	0,16	4,98	0,4	3,8	0,18

Camadas	TJST/CS	$\pm \sigma$	TJTU/CS	$\pm \sigma$	TJTI/CS	$\pm \sigma$
0	4	0,6	4	0,6	4	0,6
2	3,3	0,3	3,2	0,23	2,9	0,4
4	3,8	0,32	3,8	0,15	3,3	0,1

TJST/SS tecido de juta sem tratamento e sem pré-secagem .

TJST/CS tecido de juta sem tratamento e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTU/SS tecido de juta tratado com uretano e sem pré-secagem .

TJTU/CS tecido de juta tratado com uretano e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTI/SS tecido de juta tratado com isocianato e sem pré-secagem .

TJTI/CS tecido de juta tratada com isocianato e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

Obs. Todas as secagens foram feitas antes do processamento do laminado

Tabela A.4. Teor de Fibras dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta.

Material	Número de Camadas	Teor de fibra %	Material	Número de Camadas	Teor de fibra %
TJST/SS	2	29,3	TJST/CS	2	26,3
	4	51		4	43,7
TJTU/SS	2	33	TJTU/CS	2	29,3
	4	54		4	47,8
TJTI/SS	2	32	TJTI/CS	2	29,8
	4	52,9		4	46,7

TJST/SS tecido de juta sem tratamento e sem pré-secagem .

TJST/CS tecido de juta sem tratamento e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTU/SS tecido de juta tratado com uretano e sem pré-secagem .

TJTU/CS tecido de juta tratado com uretano e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTI/SS tecido de juta tratado com isocianato e sem pré-secagem .

TJTI/CS tecido de juta tratada com isocianato e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

Obs. Todas as secagens foram feitas antes do processamento do laminado

Exemplos de Gráficos de Resistência à Tração para Cálculo do Módulo Young.

- Feita as leituras da carga(Kg) e deformação (mm) feita a cada 0,1mm de deformação.
- Foram plotados gráficos de Resistência à Tração (MPa) em função da Deformação (%) (Figura A.1).
- No intervalo de 0,5–2% de deformação escolheu-se a parte mais linear e construiu-se um gráfico de Resistência à Tração (MPa) em função da Deformação (adm) (Figura A.2) e fez-se a regressão linear para encontrar o valor de B que corresponde ao Módulo Young (GPa).

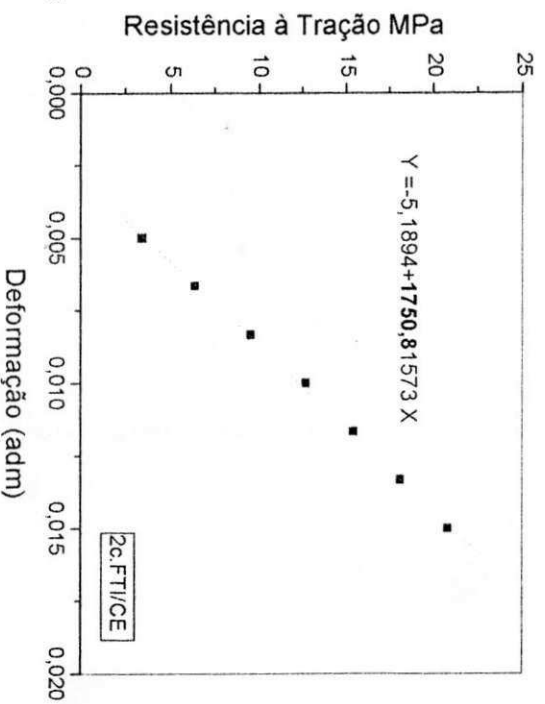
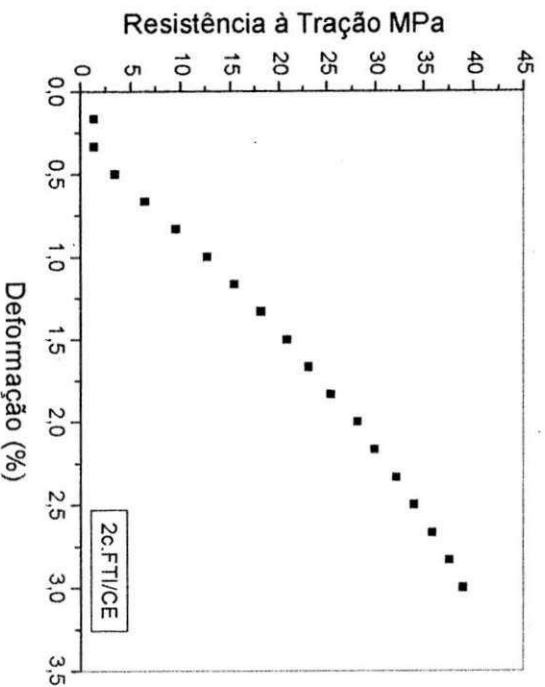
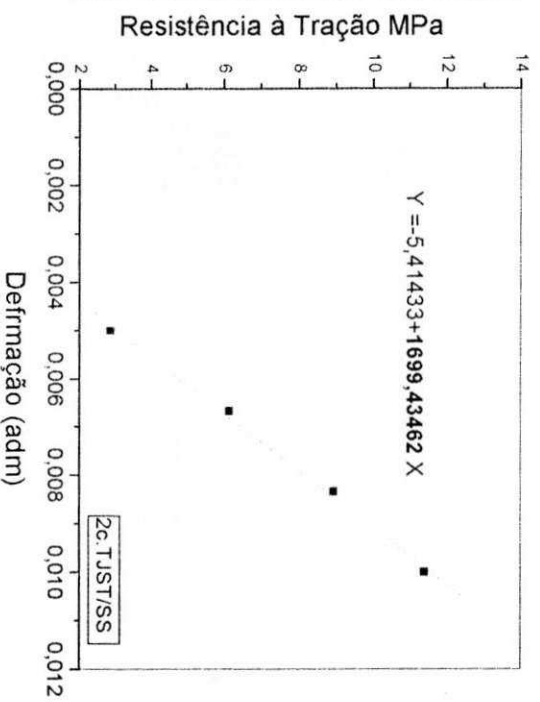
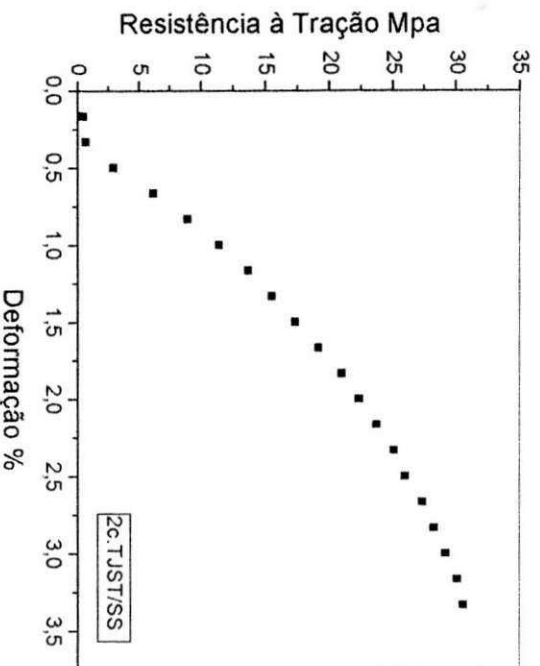


Figura A.1

Figura A.2

ANEXO B

Envelhecimento Térmico

Tabela B.1. Resistência à Tração dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C.

Amostra	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	38,6±0,8	25,1±3,14	23,8±1,64	21,3±3,2	22,7±2,94	22,4±3,3
2c.TJST/SS	29,3	29,7±2,0	21,0±2,0	21,9±3,2	21,6±1,6	20,9±2,0	20,2±1,2
2c.TJST/CS	26,3	40,1±1,3	30,9±2,4	29,0±2,0	23,9±2,5	26,2±2,05	26,2±1,73
4c.TJST/SS	51	46,4±1,7	34,5±0,7	29,3±2,5	24,1±2,6	23,2±1,2	24,4±2,2
4c.TJST/CS	43,7	55,0±2,1	42,7±2,5	39,2±4,9	35,0±4,3	36,7±2,5	35,3±4,1
2c.TJTU/SS	33	27,1±2,5	18,3±1,6	19,2±2,5	20,4±0,4	19,6±1,8	19,7±1,5
2c.TJTU/CS	29,3	38,2±2,5	23,9±1,7	24,5±4,5	22,8±2,0	22,1±1,0	24,5±1,3
4c.TJTU/SS	54	36,4±4,0	29,4±0,95	26,8±2,3	23,7±2,5	25,7±1,6	25,3±3,0
4c.TJTU/CS	47,8	45,4±3,8	36,5±3,1	35,1±2,9	32,2±3,7	37,7±1,0	37,9±2,4
2c.TJTI/SS	32	32,3±4,1	20,0±2,1	21,4±2,6	24,7±2,5	24,9±2,5	21,6±2,3
2c.TJTI/CS	29,8	38,9±3,2	27,1±1,4	23,4±2,1	22,7±3,6	22,7±1,43	24,3±3,7
4c.TJTI/SS	52,9	45,6±2,0	34,5±3,1	30,7±2,0	27,8±1,5	27,9±0,7	29,1±4,2
4c.TJTI/CS	46,7	50,9±3,6	37,0±2,1	37,9±1,5	37,0±1,5	36,0±1,2	36,9±3,5

Tabela B.2. Módulo Young dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C.

Amostra	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	1,2±0,13	1,2±0,04	1,1±0,09	1,45±0,3	1,6±0,08	1,7±0,05
2c.TJST/SS	29,3	1,6±0,19	1,8±0,10	2,1±0,15	2,4±0,2	2,2±0,11	2,3±0,14
2c.TJST/CS	26,3	1,9±0,05	2,4±0,18	2,2±0,18	2,4±0,07	2,3±0,16	2,5±0,05
4c.TJST/SS	51	2,5±0,16	2,5±0,22	2,3±0,05	2,1±0,22	1,9±0,11	1,9±0,13
4c.TJST/CS	43,7	2,4±0,16	2,9±0,15	2,6±0,15	2,7±0,15	2,8±0,15	2,7±0,16
2c.TJTU/SS	33	1,4±2,5	1,6±0,11	1,7±0,2	2,0±0,15	1,9±0,08	1,8±0,25
2c.TJTU/SS	29,3	2,1±0,09	2,1±0,22	2,0±0,13	2,1±0,18	2,0±0,05	2,3±0,18
4c.TJTU/SS	54	1,3±0,09	1,6±0,16	1,9±0,21	1,8±0,15	1,8±0,07	1,8±0,17
4c.TJTU/CS	47,8	2,0±0,24	2,2±0,13	2,4±0,27	2,5±0,17	2,4±0,16	2,4±0,13
2c.TJTI/SS	32	1,7±0,1	1,8±0,12	1,9±0,24	2,4±0,24	2,5±0,13	2,2±0,28
2c.TJTI/CS	29,8	1,8±0,11	2,3±0,28	2,0±0,05	2,1±0,16	2,2±0,05	2,1±0,17
4c.TJTI/SS	52,9	1,9±0,11	1,9±0,13	2,2±0,23	2,1±0,21	2,0±0,27	2,1±0,23
4c.TJTI/CS	46,7	2,4±0,19	2,3±0,13	2,4±0,16	2,7±0,15	2,5±0,22	2,6±0,28

Tabela B.3. Deformação dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C.

Amostra	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	4,0±0,6	2,8±0,44	2,5±0,5	2,1±0,37	1,7±0,37	1,6±0,16
2c.TJST/SS	29,3	3,1±0,29	1,4±0,15	1,5±0,14	1,3±0,11	1,3±0,07	1,2±0,11
2c.TJST/CS	26,3	3,3±0,3	1,8±0,13	1,5±0,2	1,5±0,17	1,6±0,28	1,5±0,13
4c.TJST/SS	51	3,4±0,16	2,4±0,19	2,0±0,23	1,7±0,08	1,9±0,15	1,8±0,26
4c.TJST/CS	43,7	3,8±0,32	2,1±0,09	1,9±0,15	1,7±0,22	1,8±0,12	1,9±0,17
2c.TJTU/SS	33	3,0±0,25	1,9±0,3	1,8±0,13	1,5±0,15	1,5±0,2	1,4±0,25
2c.TJTU/CS	29,3	3,2±0,23	2,0±0,18	1,8±0,25	1,6±0,11	1,5±0,07	1,6±0,19
4c.TJTU/SS	54	5,0±0,4	3,7±0,24	2,6±0,55	2,3±0,14	2,6±0,22	2,4±0,39
4c.TJTU/CS	47,8	3,7±0,15	2,5±0,25	2,2±0,12	1,8±0,15	2,1±0,19	2,3±0,25
2c.TJTI/SS	32	2,9±0,3	1,7±0,3	1,7±0,26	1,4±0,17	1,4±0,08	1,5±0,18
2c.TJTI/CS	29,8	2,9±0,4	1,8±0,11	1,6±0,18	1,5±0,15	1,6±0,17	1,6±0,2
4c.TJTI/SS	52,9	3,8±0,18	2,9±0,5	2,4±0,27	2,2±0,09	2,1±0,15	2,1±0,13
4c.TJTI/CS	46,7	3,3±0,1	2,4±0,13	2,2±0,3	2,0±0,13	2,2±0,28	2,1±0,27

Tabela B.4. Resistência à Tração Relativa dos Compósitos Poliéster/Juta

Amostras	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		Valores Relativos (%) ao tempo 0					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	100	65	62	55	59	58
2c.TJST/SS	29,3	100	71	74	73	70	64
4c.TJST/SS	51	100	74	63	52	50	53
2c.TJST/CS	26,3	100	77	72	60	65	65
4c.TJST/CS	43,7	100	78	71	64	67	64
2c.TJTU/SS	33	100	68	71	75	72	73
4c.TJTU/SS	54	100	81	74	65	71	70
2c.TJTU/CS	29,3	100	63	64	60	58	64
4c.TJTU/CS	47,8	100	80	77	71	83	83
2c.TJTI/SS	32	100	62	66	76	77	67
4c.TJTI/SS	52,9	100	76	67	61	61	64
2c.TJTI/CS	29,8	100	70	60	58	58	62
4c.TJTI/CS	46,7	100	73	74	73	71	72

Tabela B.5. Módulo Young Relativa dos Compósitos Poliéster/Juta

Amostras	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		Valores Relativos (%) ao tempo 0					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	100	100	92	121	133	142
2c.TJST/SS	29,3	100	112	131	150	137	156
4c.TJST/SS	51	100	100	92	84	76	76
2c.TJST/CS	26,3	100	126	116	126	121	131
4c.TJST/CS	43,7	100	121	108	112	117	112
2c.TJTU/SS	33	100	114	121	143	136	129
4c.TJTU/SS	54	100	123	146	138	138	138
2c.TJTU/CS	29,3	100	100	95	100	95	109
4c.TJTU/CS	47,8	100	110	120	125	120	120
2c.TJTI/SS	32	100	106	112	141	147	129
4c.TJTI/SS	52,9	100	100	116	110	105	110
2c.TJTI/CS	29,8	100	128	111	117	122	117
4c.TJTI/CS	46,7	100	96	100	112	104	108

Tabela B.6. Deformação Relativa dos Compósitos Poliéster/Juta

Amostra	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		Valores Relativos (%) ao tempo 0					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	100	62	70	52	42	40
2c.TJST/SS	29,3	100	45	48	42	42	39
4c.TJST/SS	51	100	70	59	50	56	53
2c.TJST/CS	26,3	100	54	45	45	48	45
4c.TJST/CS	43,7	100	55	50	45	47	50
2c.TJTU/SS	33	100	63	60	50	50	47
4c.TJTU/SS	54	100	74	52	46	52	48
2c.TJTU/CS	29,3	100	62	56	50	47	44
4c.TJTU/CS	47,8	100	67	59	49	57	62
2c.TJTI/SS	32	100	59	59	48	48	52
4c.TJTI/SS	52,9	100	76	63	58	55	55
2c.TJTI/CS	29,8	100	62	55	52	55	55
4c.TJTI/CS	46,7	100	73	67	61	67	64

**B.7. Resistência à Tração Relativa dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta
Envelhecido em Estufa 110°C. - Efeito da Secagem.**

Amostras	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		Valores Relativos à Matriz					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	100	100	100	100	100	100
2c.TJST/SS	29,3	77	68	92	101	92	90
		27%	55%	30%	11%	23%	27%
2c.TJST/CS	26,3	104	123	122	112	115	117
4c.TJST/SS	51	120	137	123	113	102	109
		22%	33%	42%	34%	60%	48%
4c.TJST/CS	43,7	142	70	65	164	162	157
2c.TJTU/SS	33	70	73	81	96	86	88
		29%	22%	22%	11%	11%	21%
2c.TJTU/SS	29,3	99	95	103	107	97	109
4c.TJTU/SS	54	94	117	113	111	113	113
		24%	28%	34%	40%	53%	56%
4c.TJTU/CS	47,8	118	145	147	151	166	169
2c.TJTI/SS	32	84	80	90	116	110	96
		17%	28%	8%	10%	10%	12%
2c.TJTI/CS	29,8	101	108	98	106	100	108
4c.TJTI/SS	52,9	118	137	129	130	123	130
		14%	10%	30%	27%	35%	35%
4c.TJTI/CS	46,7	132	147	159	157	158	165

B.8. Módulo Young Relativo dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C. - Efeito da Secagem.

Amostra	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		Valores Relativos à Matriz					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	100	100	100	100	100	100
2c.TJST/SS	29,3	133	150	191	165	137	135
		25%	50%	9%	0%	7%	12%
2c.TJST/CS	26,3	158	200	100	165	144	147
4c.TJST/SS	51	208	208	209	145	119	112
		8%	34%	27%	41%	56%	47%
4c.TJST/CS	43,7	200	242	236	186	175	159
2c.TJTU/SS	33	117	133	154	138	119	106
		58%	42%	28%	7%	6%	30%
2c.TJTU/CS	29,3	175	175	182	145	125	136
4c.TJTU/SS	54	108	133	173	124	112	106
		59%	45%	45%	48%	38%	35%
4c.TJTU/CS	47,8	167	183	118	172	150	141
2c.TJTI/SS	32	142	150	173	166	156	129
		8%	42%	9%	21%	19%	6%
2c.TJTI/CS	29,8	150	192	182	145	137	123
4c.TJTI/SS	52,9	158	158	100	145	125	123
		42%	34%	18%	41%	31%	30%
4c.TJTI/CS	46,7	200	192	218	186	156	153

B.9. Deformação Relativa dos Compósitos Poliéster/Tecido de Juta Envelhecido em Estufa 110°C. - Efeito da Secagem.

Amostra	Teor de Fibras %	Tempo de Exposição em Estufa 110 °C (dias)					
		Valores Relativos à Matriz					
		0	10	20	30	40	50
Poliéster	0	100	100	100	100	100	100
2c.TJST/SS	29,3	77	56	54	62	76	75
		5%	16%	0%	9%	18%	19%
2c.TJST/CS	26,3	82	72	54	71	94	94
4c.TJST/SS	51	85	96	71	81	112	112
		10%	12%	3%	0%	6%	7%
4c.TJST/CS	43,7	95	84	68	81	106	119
2c.TJTU/SS	33	75	76	64	71	88	87
		5%	4%	0%	5%	0%	13%
2c.TJTU/SS	29,3	80	80	64	76	88	100
4c.TJTU/SS	54	125	148	93	109	153	150
		33%	48%	15%	23%	30%	6%
4c.TJTU/CS	47,8	92	100	78	86	123	144
2c.TJTI/SS	32	72	68	61	67	82	94
		0%	4%	4%	4%	12%	6%
2c.TJTI/CS	29,8	72	72	57	71	94	100
4c.TJTI/SS	52,9	95	116	86	105	123	131
		13%	20%	7%	10%	6%	0%
4c.TJTI/CS	46,7	82	96	79	95	129	131

ANEXO C

Sorção de Água

Tabela C.1. Coeficiente de Difusão de Água em Compósito Poliéster/Tecido de Juta. - Para Tempos Longos.

AMOSTRAS	Teor de Fibras %	$D \times 10^{12} \text{ m/s}^2$	$a=\text{exp.A}$	R	SD
Poliéster	0	1,94	0,70	0,99611	0,03128
2c.TJST/SS	29,3	1,94	0,69	0,99852	0,07433
2c.TJST/CS	26,3	1,08	0,86	0,99868	0,03859
4c.TJST/SS	51	3,16	0,65	0,99797	0,07076
4c.TJST/CS	43,7	2,47	0,76	0,99845	0,04925
2c.TJTU/SS	33,2	1,67	0,90	0,99932	0,04814
2c.TJTU/CS	29,3	1,16	0,81	0,99672	0,06853
4c.TJTU/SS	54	3,99	0,69	0,99608	0,07495
4c.TJTU/CS	47,8	2,21	0,80	0,99538	0,07327
2c.TJTI/SS	32,0	1,04	0,80	0,99255	0,06445
2c.TJTI/CS	29,8	0,69	0,93	0,99908	0,02762
4c.TJTI/SS	52,9	2,47	0,81	0,99758	0,05752
4c.TJTI/CS	46,7	2,08	0,83	0,99718	0,04295

TJST/SS tecido de juta sem tratamento e sem pré-secagem.

TJST/CS tecido de juta sem tratamento e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTU/SS tecido de juta tratado com uretano e sem pré-secagem .

TJTU/CS tecido de juta tratado com uretano e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTI/SS tecido de juta tratado com isocianato e sem pré-secagem .

TJTI/CS tecido de juta tratada com isocianato e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

Obs. Todas as secagens foram feitas antes do processamento do laminado.

Tabela C.2. Coeficiente de Difusão de Água em Compósito Poliéster/Tecido de Juta. - Para Tempos Curtos.

AMOSTRAS	Teor de Fibras %	$D \times 10^{12} \text{ m/s}^2$	R	SD
Poliéster	0	1,90	0,99497	0,01454
2c.TJST/SS	29,3	0,570	0,99961	0,00636
2c.TJST/CS	26,3	0,324	0,99927	0,00537
4c.TJST/SS	51	0,697	0,99939	0,00724
4c.TJST/CS	43,7	0,516	0,99359	0,02791
2c.TJTU/SS	33,2	0,528	0,99857	0,01412
2c.TJTU/CS	29,3	0,301	0,99863	0,01418
4c.TJTU/SS	54	0,860	0,99953	0,0072
4c.TJTU/CS	47,8	0,662	0,99808	0,01556
2c.TJTI/SS	32,0	0,442	0,99846	0,00751
2c.TJTI/CS	29,8	0,152	0,99814	0,01131
4c.TJTI/SS	52,9	0,697	0,99918	0,01031
4c.TJTI/CS	46,7	0,495	0,99673	0,02228

TJST/SS tecido de juta sem tratamento e sem pré-secagem .

TJST/CS tecido de juta sem tratamento e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTU/SS tecido de juta tratado com uretano e sem pré-secagem .

TJTU/CS tecido de juta tratado com uretano e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

TJTI/SS tecido de juta tratado com isocianato e sem pré-secagem .

TJTI/CS tecido de juta tratada com isocianato e com pré-secagem em estufa 90°C/24h.

Obs. Todas as secagens foram feitas antes do processamento do laminado.

Exemplos de Gráficos de Absorção de Água para Cálculos de Coeficientes de Difusão.

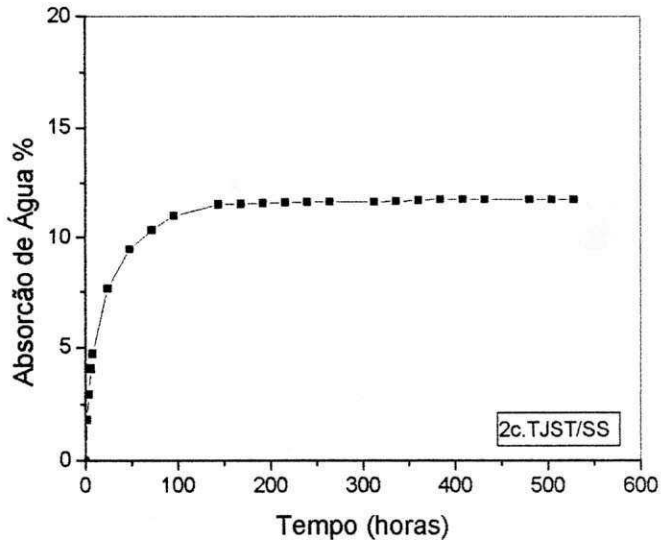


Figura - C.1

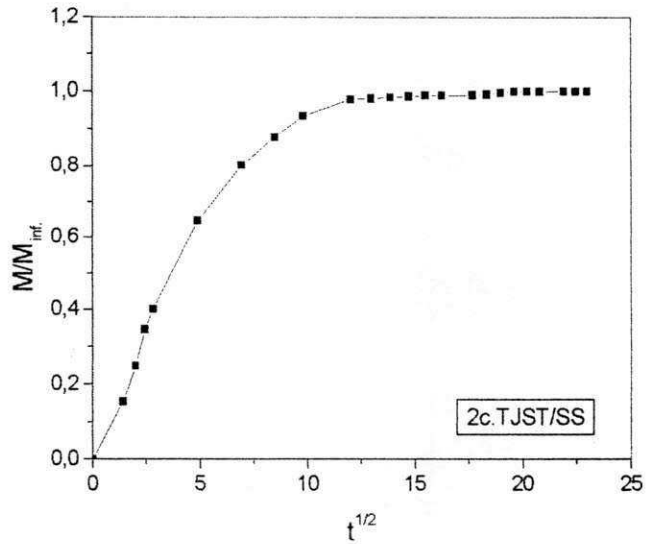


Figura - C.2

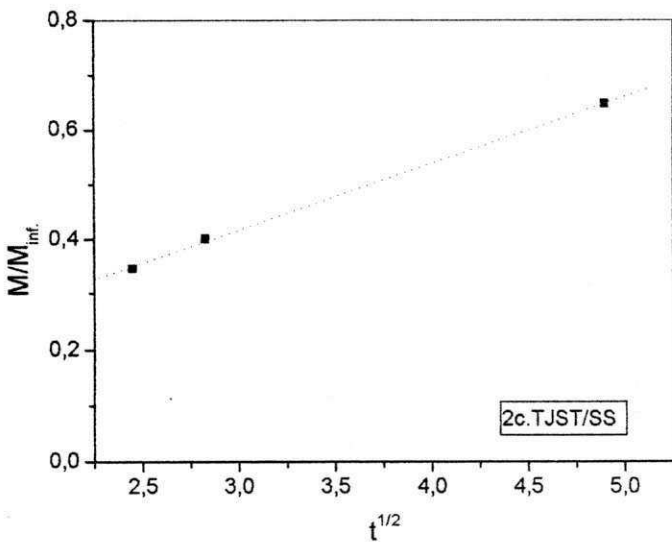


Figura - C.3

Linear Regression 2c.TJST/SS

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error
A	0,05216	0,01214
B	0,12184	0,00341
R	0,99961	
SD	0,00636	
N	3	
P	0,01781	

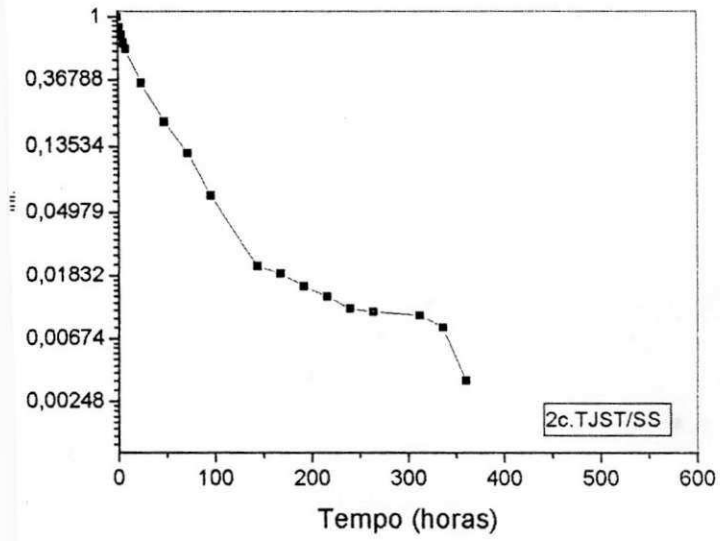


Figura - C.4

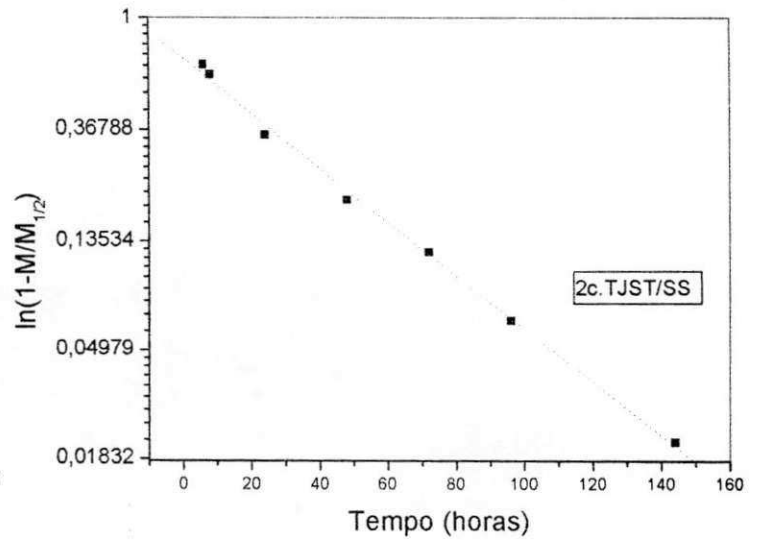


Figura - C.5

Linear Fit para 2c.TJST/SS
 $(Y) = A + B * x$

Parameter	Value	Error	
A	-0,36459	0,04408	
B	-0,02449	5,97394E-4	
R	SD	N	P
-0,99852	0,07434	7	<0.0001