

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“ COMPÓSITOS POLIÉSTER - JUTA: EFEITOS DE
MODIFICAÇÕES QUÍMICAS NO REFORÇO E NA MATRIZ
POLIÉSTER ”**

REGEILDO COSTA

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO - 1997

REGEILDO COSTA

**“ COMPÓSITOS POLIÉSTER - JUTA: EFEITOS DE
MODIFICAÇÕES QUÍMICAS NO REFORÇO E NA MATRIZ
POLIÉSTER ”**

Dissertação apresentada ao Curso de
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO :
Materiais e Processo de Fabricação

ORIENTADORES

D.Sc. MARCO ANTONIO DOS SANTOS

Dr^a. LAURA HECKER DE CARVALHO

CAMPINA GRANDE - PB
DEZEMBRO - 1997



C837c Costa, Regeildo Costa.
"Compósitos poliéster - juta : efeitos de modificações químicas no reforço e na matriz poliéster" / Regeildo Costa. - Campina Grande, 1997.
137 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1997.
Referências.
"Orientação : Prof. Dr. Marco Antônio dos Santos, Prof^a. Dr^a. Laura Hecker de Carvalho".

1. Nanocompósitos. 2. Compósitos Poliéster - Juta. 3. Processamento Químico. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Santos, Marco Antônio dos. II. Carvalho, Laura Hecker de. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 678.7(043)

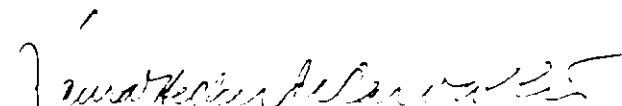
**“ COMPÓSITOS POLIÉSTER - JUTA: EFEITOS DE
MODIFICAÇÕES QUÍMICAS NO REFORÇO E NA MATRIZ
POLIÉSTER ”**

REGEILDO COSTA

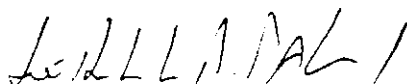
DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 16/12/1997



D.Sc. MARCO ANTONIO DOS SANTOS
(ORIENTADOR)



DR^ª. LAURA HECKER DE CARVALHO
(ORIENTADORA)



Dr. JOSÉ ROBERTO MORAIS D'ALMEIDA
(MEMBRO)



Dr^ª. EVE MARIA FREIRE AQUINO
(MEMBRO)

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO - 1997

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, JOÃO TEOTÔNIO DA
COSTA e MARIA DA GUIA COSTA,
principalmente na pessoa da minha mãe
que sempre acreditou no meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, por sua bondade, justiça e sabedoria que permitiu a realização deste trabalho, dando-me força para enfrentar as adversidades surgidas durante este período.

À minha namorada APARECIDA CABRAL, pela força e apoio nos momentos difíceis.

Ao Professor MARCO ANTONIO DOS SANTOS, por sua orientação e amizade. Principalmente pela pessoa exigente e " cabeça dura ", mas que soube conduzir o trabalho com grande visão.

À Professora LAURA HECKER DE CARVALHO, pela orientação e amizade, principalmente pelos " puxões de orelhas " dados durante este período.

Ao Professor MANASSES DA COSTA AGRA, pelo apoio concedido e principalmente pela amizade compartilhada, sendo de fundamental importância sua colaboração.

Ao Professor JOÃO BATISTA, pela ajuda nos ensaios na MTS que foi de fundamental importância para a conclusão de alguns resultados.

Ao amigo ALBERTO PORTO QUIRINO, pelo valoroso apoio nos momentos mais difíceis e que deste o início do curso esteve presente.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da UFPB / CAMPUS II, nas pessoas do antigo Coordenador NATANAEL VICTOR DE OLIVEIRA e da secretária LÚCIA MÁRCIA DONATO QUIRINO, pelo apoio que foi de fundamental importância na conclusão deste trabalho, como também nas pessoas do atual Coordenador ANTÔNIO PRALON e vice THEOPHILO MOURA MACIEL.

Aos mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica NILSON (Chefe da Oficina Mecânica) e MÁRIO GOMES DA SILVA e a Todos que de forma direta ou indireta auxiliaram na confecção dos corpos de prova, que foram conclusivos neste trabalhos.

Aos amigos ROSILENE e WILTON BATISTA pelo apoio nos testes mecânicos no laboratório de Engenharia de Materiais.

A todos os Professores do Curso de Pós-Graduação e do Departamento de Engenharia Mecânica.

À CAPES pelo financiamento da pesquisa.

Às indústrias RESANA, INDÚSTRIA TÊXTIL CASTANHAL e a EQUIFIBER (na pessoa do Dr. Laurino) pelo fornecimento do material de pesquisa utilizado neste trabalho.

Ao amigo CLÁUDIO JOSÉ MAGALHÃES DE LIMA " In memoriam" que teve sua caminhada interrompida, por causa da violência humana.

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xvi
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
SIMBOLOGIA.....	xxi
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 - INTRODUÇÃO.....	5
2.2 - COMPÓSITOS.....	6
2.2.1 - Tipos de Compósitos.....	7
2.2.2 - Processo de Fabricação dos Compósitos.....	11

2.2.3 - Interface Fibra-Matriz	13
2.2.4 - Compósito Poliéster - Fibras Vegetal	16
2.2.4.1 - Fibra Vegetal	16
2.2.4.2 - Fibra de Juta	20
2.2.4.2.1 - Estrutura Química	23
2.2.4.2.2 - Propriedades da Fibra de Juta	25
2.2.4.3 - Resina Poliéster	26
2.2.4.3.1 - Estrutura do Poliéster Insaturado	27
2.2.4.3.2 - Processo de Cura da Resina Poliéster	31
2.2.4.3.3 - Agentes Modificadores Superficiais	32
2.2 - MECANISMO DE FRATURA	34
2.2.1 - Introdução	34
2.2.2 - Mecânica da Fratura Aplicada a Compósitos Reforçados por Fibras	37
2.2.3 - Mecanismo de Tenacidade à Fratura e Dissipação de Energia	42
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA	46
4 - MATERIAIS e MÉTODOS	62
4.1 - MATERIAIS	62
4.1.1 - Introdução	62
4.1.2 - Resina Poliéster	62
4.1.3 - Reforço	64
4.1.4 - Estireno	64

4.1.5 - Modificadores Superficiais Utilizados	65
4.1.5.1 - Pré-Polímero Isocianato	66
4.1.5.2 - Polioli	66
4.1.5.3 - Uretano	67
4.1.6 - Desmoldante	67
4.2 - MÉTODOS.....	68
4.2.1 - Tratamento Superficial das Fibras.....	68
4.2.2 - Método de fabricação do Compósito Poliéster - Fibra de Juta	69
4.2.3 - Preparação dos Corpos de Provas / Determinação das Propriedades Mecânicas	73
4.2.3.1 - Preparação dos Corpos de Prova.....	73
4.2.3.2 - Ensaios Mecânicos Convencionais: Tração, Flexão e Impacto.....	76
4.2.3.3 - Ensaio de Tenacidade	78
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
5.1 - INTRODUÇÃO.....	83
5.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORDÕES DE JUTA	84
5.3 - EFEITO DA FRAÇÃO EM PESO DOS CORDÕES DE JUTA NAS PROPRIEDADES TÊNSEIS DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA	89
5.4 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DOS CORDÕES DE JUTA E DA MATRIZ POLIÉSTER NAS PROPRIEDADES TÊNSEIS DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.....	93

5.5 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DOS CORDÕES DE JUTA E DA MATRIZ POLIÉSTER NAS PROPRIEDADES DE FLEXÃO DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.....	105
5.6 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DOS CORDÕES DE JUTA E DA MATRIZ POLIÉSTER NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.....	116
5.7 - ESTUDO PRELIMINAR DA TENACIDADE DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.....	120
6 - CONCLUSÃO	125
7 - SUGESTÕES.....	127
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
ANEXOS	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Constituição estrutural geral das fibro-células	20
Figura 2 - Estrutura química da celulose.....	24
Figura 3 - Estrutura química da lignina.....	25
Figura 4 - Estrutura química do ácido oftálico	28
Figura 5 - Estrutura química da resina poliéster ortoftálico	29
Figura 6 - Estrutura química do ácido isoftálico	30
Figura 7 - Estrutura química da resina poliéster isoftálico.....	30
Figura 8 - Tenacidade à fratura (K_C) versus fração em peso da fibra em função da direção de propagação da trinca. GF - PET (I), compósito com diferente qualidade de ligação na interface matriz - fibra	40
Figura 9 - Tenacidade à fratura (K_C) versus fração em peso da fibra em função da direção de propagação da trinca. GF - PC. compósito com matriz tenaz	41
Figura 10 - Representação esquemática dos estágios de crescimento de trinca em um compósito com fibras.....	44
Figura 11 - Modificadores químicos da fibra (cell - OH) por vários tratamentos químicos.....	56

Figura 12 - Estrutura química do monômero de estireno	64
Figura 13 - Tábua usada para o alinhamento dos cordões.....	70
Figura 14 - Molde de borracha colocado sobre a placa de vidro.....	72
Figura 15 - Configuração das lâminas de serra usada na usinagem de entalhe	74
Figura 16 - Posição de retirada dos corpos de prova para os ensaios	74
Figura 17 - Corpo de prova para o ensaio de tração.....	75
Figura 18 - Corpo de prova para o ensaio de impacto	75
Figura 19 - Corpo de prova para o ensaio de flexão	75
Figura 20 - Esquematização do ensaio de flexão em três pontos sem entalhe	77
Figura 21 - Esquematização do ensaio de corpo de prova do tipo amostra flexão em três pontos, com entalhe	79
Figura 22 - Configuração do corpo de prova de flexão em três pontos, conforme a norma ASTM E-399.....	80
Figura 23 - Curvas características para a determinação de $P_{5\%}$ e P_0	81
Figura 24 - Registros gráficos de carga versus deslocamento de ponto de aplicação de carga, para os ensaios de tenacidade realizados	81

Figura 25 - Influência do tratamento superficial dos cordões de juta na resistência à tração	86
Figura 26 - Influência do tratamento superficial dos cordões de juta na deformação	87
Figura 27 - Influência do tratamento superficial dos cordões de juta no módulo de elasticidade.....	88
Figura 28 - Resistência à tração do compósito Poliéster - Juta versus fração em peso dos cordões juta bruta	90
Figura 29 - Deformação do compósito Poliéster - Juta versus fração em peso dos cordões de juta bruta	91
Figura 30 - Módulo de elasticidade do compósito Poliéster - Juta versus fração em peso dos cordões de juta bruta	92
Figura 31 - Resistência à tração do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos para o cordão de juta do tipo 10/2.....	96
Figura 32 - Deformação do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos para o cordão de juta do tipo 10/2.....	97
Figura 33 - Módulo de elasticidade do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos para o cordão de juta do tipo10/2	98
Figura 34 - Resistência à tração do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos para o cordão de juta do tipo 10/4	101

Figura 35 - Deformação do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordões de juta do tipo 10/4	103
Figura 36 - Módulo de elasticidade do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordões de juta do tipo 10/4	104
Figura 37 - Resistência à flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/2.....	107
Figura 38 - Deflexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta tipo 10/2	108
Figura 39 - Módulo de flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/2	109
Figura 40 - Resistência à flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/4.....	112
Figura 41 - Deflexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/4	114
Figura 42 - Módulo de flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/4	115

Figura 43 - Influência do tratamento do cordão de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta. Cordões de juta do tipo 10/2	118
Figura 44 - Influência do tratamento do cordão de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta. Cordões de juta do tipo 10/2	119
Figura 45 - Influência do tratamento do cordão e da matriz poliéster do compósito Poliéster - Juta na tenacidade (K_C). Cordões de juta do tipo 10/2.....	123
Figura 46 - Influência do tratamento do cordão e da matriz poliéster do compósito Poliéster - Juta na tenacidade (K_C). Cordões de juta do tipo 10/4.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química e parâmetros estruturais das fibras vegetais.....	19
Tabela 2 - Características e propriedades da fibra de juta.....	22
Tabela 3 - Composição da fibra de juta % (Princípio de Secagem em Estufa).....	23
Tabela 4 - Propriedades de tração de compósitos Poliéster - Juta reforçados uni e bidirecionalmente.....	51
Tabela 5 - Propriedades de flexão de compósitos Poliéster - Juta reforçados uni e bidirecionalmente.....	51
Tabela 6 - Propriedade mecânicas de tração do compósito Poliéster - Juta	53
Tabela 7 - Propriedade mecânicas de flexão do compósito Poliéster - Juta	53
Tabela 8 - Efeito da enxertia na propriedade do compósito reforçado por fibra de juta	57
Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos compósitos Poliéster - Juta com e sem tratamentos superficiais da juta à 10% em relação ao peso da fibra.....	58

Tabela 10 - Influência da direção do entalhe no fator de intensidade de tensão crítico K_C e na taxa de relaxação de energia de deformação crítica G_C do compósito com fibras unidirecionais CF / PAC ($a/W=0,5$, $B=3mm$).....	60
Tabela 11 - Tenacidade do compósito nylon-fibra de vidro.....	61
Tabela 12 - Propriedades da resina poliéster.....	63
Tabela 13 - Características do pré-polímero isocianato.....	66
Tabela 14 - Características do polioli fornecida pela PROQUINOR.....	67
Tabela 15 - Propriedades mecânicas dos cordões de juta bruta e com tratamento superficial.....	85
Tabela 16 - Propriedades mecânicas do compósito Poliéster - Juta com variação da fração em peso dos cordões de juta.....	89
Tabela 17 - Influência do tratamento dos cordões de juta (10/2) e da matriz poliéster nas propriedades mecânicas do compósito Poliéster - Juta.....	94
Tabela 18 - Influência tipo de tratamento dos cordões (10/4) e da matriz poliéster nas propriedades mecânicas do compósito Poliéster - Juta.....	99
Tabela 19 - Influência do tratamento dos cordões (10/2) e da matriz poliéster nas propriedades mecânicas de flexão do compósito Poliéster - Juta.....	106

Tabela 20 - Influência do tratamento dos cordões de juta (10/4) e da matriz poliéster nas propriedades mecânicas de flexão do compósito Poliéster - Juta	111
Tabela 21 - Influência do tratamento dos cordões de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta reforçado com cordões do tipo 10/2	116
Tabela 22 - Influência do tratamento dos cordões de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta reforçado com cordões do tipo 10/4	117
Tabela 23 - Valores de tenacidade (K_C) para o compósito Poliéster - Juta versus o tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster. Reforço com cordões de juta do tipo 10/2	121
Tabela 24 - Valores de tenacidade (K_C) para o compósito Poliéster - Juta versus o tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster. Reforço com cordões de juta do tipo 10/4	122

RESUMO

Neste trabalho desenvolveram-se compósitos Poliéster - Juta reforçados com cordões de juta de dois diâmetro distintos. Ensaios de tração, flexão, tenacidade e de resistência ao impacto IZOD foram realizados à temperatura ambiente.

Estudou-se o efeito de três tipos de tratamento superficial do reforço e de modificação da matriz poliéster, nas propriedades mecânicas convencionais e na tenacidade à fratura do compósito Poliéster - Juta.

O diâmetro de cordão, bem como o tratamento superficial realizado afetou o comportamento do compósito. Em geral, os compósitos reforçados com cordões de juta de diâmetro em torno de 0,8 mm (tipo 10/2) apresentaram um desempenho melhor, com relação as propriedades mecânicas convencionais, quando comparados aos compósitos reforçados com cordões de juta de diâmetro em torno de 1,4 mm (tipo 10/4). A resistência ao impacto IZOD aumentou com a fração volumétrica do reforço

Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados de acordo com a norma ASTM E - 399, com corpos de prova do tipo flexão a três pontos. A tenacidade à fratura do compósito Poliéster - Juta foi superior a tenacidade da matriz poliéster. Por outro lado, os compósitos reforçados com cordões de juta do tipo 10/4 apresentaram valores de tenacidade superiores aos reforçados com cordões do tipo 10/2.

ABSTRACT

In this deals couth unsaturated polyester / jute composites reinforced by jute yarns having two different diameters. Tensile, flexural, toughness and Izod impact tests were conducted at room temperature.

The influence of three different kinds on fiber surface treatments and of matrix modification on the conventional mechanical as well as on the fracture toughness of the polyester / jute composites were investigated.

Our results indicate that the yarn diameter as well as the surface treatment employed affected the composite's behavior. In general, composites reinforced with jute yarns having 0.8 mm (10/2) exhibited superior in conventional mechanical properties than those. reinforced with jute yarns of 1,4 mm in diameter (10/4) Izod impact strength of the composites increased with fiber content.

Fracture toughness testing were conducted according with ASTM E-399 rules with 3-point bending specimens. The polyester / jute composites were tougher that the matrix and composites reinforced with thicker yarns (10/4) were tougher than those reinforced with thinner yarns (10/2).

SIMBOLOGIA

AS - Y-Silano Amino Trimetoxo;

ASTM - American Standards for Testing and Materials;

B1 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/2 bruto;

B2 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/4 bruto;

CTMP - Polpa Quimi-Termo-Mecânica;

CTOD - Deslocamento da Abertura de Ponta da Trinca;

DEM - Departamento de Engenharia Mecânica;

DEMa - Departamento de Engenharia de Materiais;

E - Módulo de Elasticidade;

ϵ - Deformação;

EF30L - Compósito Nylon com 30% de Fibra de Vidro Fabricado por Extrusão,
com Corpo de Prova Entalhado ao Longo da Direção da Fibra;

EF30T - Compósito Nylon com 30% de Fibra de Vidro Fabricado por Extrusão,
com Corpo de Prova Entalhado Perpendicular à Direção da Fibra;

EPFM - Mecânica da Fratura Elasto-Plástico;

G_c - Taxa de Relaxação de Energia Crítica

GF - Fibra de Vidro;

K_c - Fator de Intensidade de Tensão Crítico;

LEFM - Mecânica da Fratura Linear Elástica;

MDI - Diisocianato de Difenilmetano;

MEK - Metil Etil Cetona;

MI1 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/2 com Modificação da Matriz Poliéster com ISOCIANATO;

MI2 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/4 com Modificação da Matriz Poliéster com ISOCIANATO;

MP1 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/2 com Modificação da Matriz Poliéster com POLIOL;

MP2 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/4 com Modificação da Matriz Poliéster com POLIOL;

MU1 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/2 com Modificação da Matriz Poliéster com URETANO;

MU2 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/4 com Modificação da Matriz Poliéster com URETANO;

PALF - Folha do Abacaxi Quimicamente Modificada;

PAN - PoliAcrlonitrila;

PC - PoliCarbonato;

PET - Poli (Tereftalato de Etileno);

PF30L - Compósito Nylon com 30% de Fibra de Vidro Fabricado por Pultrusão, com Corpo de Prova Entalhado ao Longo da Direção da Fibra;

PF30L - Compósito Nylon com 30% de Fibra de Vidro Fabricado por Pultrusão, com Corpo de Prova Entalhado Perpendicular à Direção da Fibra;

PMMA - Poli (Metacrilato de Metila);

PP - PoliPropileno;

PS - PoliEstireno;

RP - Resina Pura (sem tratamento);

s - Desvio Padrão

SC - Cloreto Sebacoil;

σ_R - Resistência à Tração;

TDI - Diisocianato Tolileno;

TI - Tratamento do Cordão de Juta com ISOCIANATO;

TI1 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/2 Tratado com ISOCIANATO;

TI2 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/4 Tratado com ISOCIANATO;

TP - Tratamento do Cordão de Juta com POLIOL;

TP1 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/2 Tratado com POLIOL;

TP2 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/4 Tratado com POLIOL;

TTS - Isopropil Triisostearol Titanato;

TU - Tratamento do Cordão de Juta com URETANO;

TU1 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/2 Tratado com URETANO;

TU2 - Compósito Poliéster - Juta Reforçado por Cordão 10/4 Tratado com URETANO;

UFPB - Universidade Federal da Paraíba.

1 - INTRODUÇÃO

Muitos Pesquisadores tem se dedicado a desenvolver diversos tipos de materiais compósitos que são definidos como a combinação de dois ou mais materiais a fim de explorar suas propriedades individuais, obtendo-se no conjunto características superiores àquelas dos componentes individuais. A utilização de materiais compósitos é tão antiga quanto o homem, contudo, com o domínio do conhecimento na ciência dos materiais, tem-se consolidado um amplo espaço no âmbito dos materiais compósitos avançados, possibilitando a sua utilização, bem como, aumentando as opções para o seu emprego em diversas aplicações industriais.

A fabricação de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais é uma tecnologia que vários grupos de pesquisas no Brasil e no mundo têm estudado, em resposta à preservação ambiental. O Brasil destaca-se nessa área por possuir a maior biomassa e extensão territorial cultivável do mundo, e por isso indústrias multinacionais, em particular do setor automobilístico, estão investindo no país para o desenvolvimento desses materiais. MATTOSO [1].

O uso de recursos vegetais para a produção de compósitos poliméricos é uma alternativa de grande importância tecnológica por ser uma fonte renovável de energia, reciclável, biodegradável e de baixo custo. O beneficiamento de vegetais para a produção de polímeros naturais na forma de fibras e de borracha é uma atividade que está recuperando o interesse nas indústrias químicas e de transformação de plásticos.

Os materiais compósitos reforçados por fibras caracterizam-se pela

alta resistência mecânica, alto módulo de elasticidade aliada à baixa densidade quando comparados aos materiais convencionais como o aço e o alumínio. O processo de seleção dos materiais para uma dada aplicação envolve a seleção cuidadosa de materiais com características específicas para aquela função. A combinação com outros componentes de propriedades distintas, desenvolvendo materiais híbridos tem grande destaque nas pesquisas realizadas em todo o mundo.

As fibras vegetais por apresentarem um bom conjunto de propriedades físicas e mecânicas, além de serem leves, abundantes, de baixo custo e biodegradáveis, além de constituírem recursos renováveis, tem despertado o interesse dos pesquisadores, que apresentam-nas como um material promissor na confecção de compósitos de matriz polimérica, pois estas fibras tem resistência e módulo mais elevados que as dos plásticos. SHAH [2].

As fibras vegetais possuem um enorme potencial de aplicação na indústria automobilística para o revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões em partes como portas laterais e do bagageiro, teto, painéis, encosto, e outros. Um bom exemplo é a Mercedes Benz do Brasil, que em 1994 consumiu cerca de 5.570 toneladas de materiais naturais renováveis, das quais 4.000 toneladas foram de borracha natural, 60 de fibra de juta e coco e 160 de algodão. A empresa está estudando ainda com seus fornecedores uma variedade de outras aplicações de fibras vegetais na fabricação de seus veículos, como por exemplo a fibra de rami com resina poliéster ou resina epóxi (que formam um compósito forte e resistente) no pára-sol externo, onde hoje é empregada a fibra de vidro com resina poliéster.

A resistência do rami também pode permitir o seu uso nos pára-choques. Fibras de sisal e de coco estão sendo introduzidas nos encostos do banco e do assento, o que, na realidade, não é novidade na indústria automobilística do país. Até 1972, todas as montadoras brasileiras usavam os assentos automotivos em moldados de fibra de coco-látex (crina-látex); a partir daquele ano iniciou-se a retração do mercado de crina-látex, pois foram sendo gradativamente substituídos por assentos automotivos confeccionados em espuma de poliuretano, um derivado do petróleo importado, MATTOSO [1].

Os compósitos que empregam fibras vegetais tem constituído uma alternativa de material para algumas aplicações específicas. As fibras vegetais como sisal, juta, rami e outras podem substituir as fibras sintéticas, como a fibra de vidro, em aplicações onde não se necessita de um valor muito elevado de resistência. Contudo, com o intuito de elevar o valor da resistência do compósito reforçado por fibra vegetal faz-se necessário utilizar agentes modificadores superficiais que garantam uma melhor interação na interface fibra-matriz, elevando o valor das propriedades mecânicas. Este tópico, especificamente, vem se tornando um ponto fundamental de vários trabalhos de pesquisa, sobre compósitos reforçados por fibras vegetais.

No presente trabalho, o comportamento mecânico do compósito Poliéster - Juta reforçado por cordões de juta contínuos foi investigado. Tendo em vista a necessidade de desenvolvimento técnico e regional, visando o aproveitamento de recursos naturais e visando fornecer novas alternativas na utilização das fibras vegetais é que escolheu-se a fibra de juta, na forma de cordões com diâmetros distintos, como elemento de reforço em matriz poliéster. A

matriz empregada foi escolhida por suas características mecânicas, baixo custo, facilidade de aplicação e versatilidade na utilização.

Os efeitos das modificações superficiais das fibras de juta, com três modificadores distintos, nas propriedades mecânicas de compósitos unidirecionais Poliéster - Juta foram investigados. A influência da incorporação direta destes modificadores à matriz poliéster, seguida pela deposição desta mistura às fibras, nas propriedades mecânicas dos compósitos unidirecionais também foi analisadas e as propriedades dos dois sistemas comparadas.

2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 - INTRODUÇÃO

O progresso da humanidade é sempre referenciado quanto ao estágio de desenvolvimento pelo qual passou ou está passando. Ênfase toda especial é dada ao relacionamento do estágio evolutivo com o desenvolvimento e aplicações dos materiais. Exemplos são as referências feitas à "Idade da pedra polida", "Idade do cobre", ..., "Idade do aço". A denominação dada às etapas do desenvolvimento do Homem destaca a importância dos materiais como referência e meio de evolução, sempre buscando seu uso seguro, eficiente, confortável e de baixo custo.

O grande número de materiais que podem ser usados como matriz ou reforço tornam os compósitos extremamente atraentes, pois a evolução da tecnologia dos processos permite o emprego dos plásticos reforçados com vantagens econômicas e produtivas, além de permitir o desenvolvimento de produtos com propriedades específicas.

Em se tratando de reforço, as fibras de vidro foram as precursoras das aplicações, inovações e melhorias tecnológicas no desenvolvimento de materiais compósitos. Entretanto, hoje existem outras fibras sintéticas com ótimas perspectivas de substituir com vantagens as fibras de vidro. Fibras de carbono, boro e Kevlar, por exemplo, destacam-se por suas características mecânicas, porém, estas fibras são bem mais caras do que as de vidro e suas aplicações restringem-se a casos em que seu elevado custo se justifique, BLASS [3].

As fibras vegetais por apresentarem boas características físicas e mecânicas, tem despertado grande interesse nos pesquisadores do mundo inteiro, pois suas características permitem sua utilização numa variada gama de aplicações, inclusive como elemento de reforço em matrizes poliméricas.

2.2 - COMPÓSITOS

Um compósito consiste na combinação de dois ou mais materiais com características individuais distintos. Um é a fase contínua ou matriz e o outro é a fase dispersa, obtendo-se um novo material a partir dessa combinação, de propriedades distintas das fases individuais, FLINN [4].

As propriedades dos compósitos dependem fundamentalmente da forma como os componentes individuais interagem entre si, ou seja, dependem da interface entre as fases contínua e dispersa. A fase dispersa pode ser composta de cargas particuladas, plaquetárias (ou escamas) ou fibrosas, com características próprias quanto ao reforço produzido, sendo que a sua granulometria e distribuição granulométrica, porosidade, atividade química e razão de aspecto afetam as propriedades finais do compósito, FLINN [4]. As propriedades dos compósitos dependem basicamente dos seguintes fatores:

- a) propriedades dos componentes individuais;
- b) razão de aspecto e porosidade do reforço;
- c) grau de interação entre as fases características da interface e

d) grau de homogeneidade e característica da mistura.

Geralmente a adição de um agente de acoplamento adequado melhora a adesão interfacial entre a matriz e o reforço e algumas das propriedades mecânicas dos compósitos, BUSIGIN et al [5]. Estes efeitos se manifestam mais fortemente em compósitos reforçados por fibras. A interface matriz-fibra exerce uma função crítica nas propriedades mecânicas e físicas do compósito. As grandes diferenças entre as propriedades elásticas da matriz e da fibra devem ser comunicadas através da interface, ou seja, as tensões que atuam na matriz são transmitidas às fibras através da interface.

2.2.1 - Tipos de Compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com a composição química dos constituintes e com a 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 incorporados 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 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 extrema fragilidade. Alguns dos principais materiais

cerâmicos incorporados em compósitos são: fibras de carbono, fibras de grafite, carbeto de silício, nitreto de boro, nitreto de titânio e outras. Esta classe de cerâmica destaca-se pela sua elevada resistência mecânica à elevadas temperaturas.

Os materiais metálicos apresentam como características gerais ductilidade e condutividade, térmica e elétrica, excelentes. Os átomos estão unidos em sua estrutura através de ligações metálicas, caracterizadas pela presença de elétrons livres. A combinação de diferentes elementos metálicos e não metálicos favorece a fabricação de materiais dentro de uma ampla faixa de propriedades desejadas. Metais como o tungstênio e ligas de alumínio e titânio são os principais exemplos de metais com aplicações em compósitos. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua alta densidade.

Os materiais poliméricos são orgânicos e destacam-se pela sua baixa densidade e fácil conformação, além de elevada resistividade elétrica. Sua estrutura é constituída de macromoléculas formadas a partir de ligações covalentes, e, coesas entre si por fracas interações intermoleculares. Esta última característica estrutural limita o uso dos polímeros, comparando-se com outros tipos de materiais. Na maioria das aplicações em forma de compósitos, os polímeros atuam como matriz aglomerante do reforço. Assim, as resinas termofixas como o poliéster insaturado ou o epóxi servem como matriz para materiais reforçados com fibras de vidro e fibras de carbono. Uma exceção é a fibra de Kevlar que embora polimérica, é utilizada como reforço em matrizes poliméricas.

Os materiais compósitos são constituídos pela combinação de

materiais: cerâmicos e poliméricos; cerâmicos e metálicos; poliméricos e metálicos; e cerâmicos, metálicos e poliméricos. As possíveis combinações na estrutura dos compósitos dependem das propriedades desejadas. A conjugação de materiais cerâmicos e metálicos tem sido utilizada, por exemplo, na fabricação de CERMETS, onde a maleabilidade da matriz metálica pode ser combinada com a dureza de pós-cerâmicos. Estes compósitos são fabricados pelo processo de metalurgia do pó e são geralmente utilizados como ferramentas de corte. Matrizes metálicas podem ser reforçadas com materiais cerâmicos como WHISKERS de carbeto de silício (SiC). Nesse caso, a tenacidade da matriz pode ser conjugada com a elevada dureza e rigidez dos monocristais de SiC. Esta combinação confere o dobro do módulo de elasticidade e da resistência mecânica, quando comparada com os materiais monolíticos tradicionais.

O uso dos materiais poliméricos em compósitos deve-se quase que estritamente à sua leveza e fácil conformação. Assim, resinas poliméricas são usadas para aglomerar e estruturar compósitos constituídos de fibras e filamentos de alta resistência mecânica. As fibras podem ser fabricadas a partir de materiais cerâmicos como o vidro e a grafita ou de materiais metálicos como o aço, o tungstênio revestido com boro, etc. A combinação de materiais cerâmicos, metálicos e poliméricos em um material compósito tem como exemplo a fabricação de pneus de automóveis reforçados com filamentos de aço. Neste tipo de estrutura, a borracha é o componente polimérico; o negro-de-fumo (carbono em pó) é o componente cerâmico e o filamento de aço é o componente metálico. A elasticidade da borracha é combinada com o aumento da resistência à abrasão promovido pelo negro-de-fumo e a estrutura do pneu é reforçada mecanicamente

com o arranjo ordenado dos filamentos de aço.

O componente reforçante dos compósitos pode estar na forma particulada, na forma de filamentos ou de fibras. O maior volume de aplicação de reforço em compósitos avançados 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 submetidas, como: tecidos, mechas, fios, e outros. Em geral, tem-se uma matriz contínua que aglomera o reforço fibroso, entretanto, recentemente, a combinação de reforços fibrosos pode ser conseguida sem uma matriz contínua. Neste caso, as peças são estruturadas pura e simplesmente com a combinação têxtil de dois ou mais reforços fibrosos, HAGE [6].

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. Muitas vezes alia-se materiais com características opostas, como no caso dos materiais metálicos e materiais poliméricos, onde o primeiro é bom condutor elétrico e de calor, enquanto o segundo é isolante.

Uma outra propriedade física dos materiais que afeta diretamente a estruturação 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 [6].

2.2.2 - Processo de Fabricação dos Compósitos

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

Plásticos reforçados com fibras são fabricados de diversas maneiras. Partindo-se da moldagem por contato, estritamente manual (hand lay-up), observa-se a tendência da mecanização da fabricação de plásticos reforçados em ritmo crescente. Vários fatores como economia em função do número de peças, resistência e acabamento determinam a escolha de um dos métodos de fabricação. A seguir serão descritos os principais tipos de processos de fabricação mais utilizados na confecção de compósitos, ALBA [16], CARVALHO [15] e RESANA [71].

- * Hand lay up - É um processo simples com baixos custos de ferramentas e equipamentos, aplicável à produção de pequenas quantidades de peças e/ou peças de grande porte. O reforço pode ser de fibras contínuas ou curtas e mantas e a matriz depositada manualmente com auxílio de pincéis ou rolos.
- * Spray up - A aplicação à pistola representa um método intermediário entre a mecanização e o processo estritamente manual. A pistola aplica, simultaneamente, a resina e a fibra. Este método é usado na fabricação de peças de configuração mais complexas ou peças muito grandes. Neste caso as fibras são picotadas e aleatoriamente distribuídas.

- * **Moldagem a vácuo** - O processo de moldagem a vácuo é usado quando se requer peças de acabamento liso de ambos os lados da superfície e em séries relativamente pequenas. O acabamento liso de ambos os lados da peça moldada exige moldes macho e fêmea. Aplica-se o reforço impregnado com resina à superfície do molde. Após a vedação do mesmo com diafragma, aplica-se o vácuo, assim, distribuindo a resina uniformemente e retirando o excesso e as bolhas de ar simultaneamente. O reforço encontra-se picotado ou granulado.
- * **Moldagem por injeção** - Este método é empregado na fabricação de peças com acabamento perfeito em pequenas e médias quantidades. O reforço é introduzido no molde antes do seu fechamento, após o qual a resina catalisada é injetada sob pressão. A característica principal deste método consiste na possibilidade de execução de peças de formas geométricas complicadas. O reforço pode ser de fibra longa, tecido ou tramado.
- * **Moldagem por injeção a vácuo** - Este método de moldagem resultou de uma combinação da moldagem sob pressão (injeção) e a moldagem a vácuo, permitindo-se produzir peças com acabamento liso por ambos os lados, reduzindo-se ao mínimo o problema de bolhas e falhas de impregnação. Serve para produzir peças em séries pequenas e médias, praticamente de qualquer tamanho e geometria complexa, porém de espessura de parede não muito grossa e relativamente homogênea, onde o reforço picotado.
- * **Filament winding** - Este método é excepcionalmente racional na fabricação de peças cilíndricas como tubos e recipientes cilíndricos e substitui, quase por

completo, a fabricação manual neste setor. O material de reforço, em forma de cordões ou fitas de fibra, após passar por tanques de impregnação e o subsequente espremedor do excesso, é enrolado sobre mandril apropriado, e curado. O reforço é longo e orientado.

- * **Pultrusão** - Processo destinado a produção de perfis de seção transversal constante e de elevadas propriedades mecânicas, em que as fibras são aplicadas no sentido longitudinal (orientação no sentido do comprimento das fibras), não havendo restrição, portanto, quanto ao comprimento do perfil. O processo é contínuo e decorre da impregnação de um feixe de mechas devidamente tensionadas, em um tanque contendo resina, catalisador e pigmentos. Este tanque de impregnação é provido de guias e laminas dosadoras que retiram o excesso de resina. A seguir passam para uma matriz metálica por onde o feixe de mechas é tracionado. Estufas são normalmente utilizadas, após a matriz, para assegurar uma perfeita cura e aumentar a velocidade do processo. O reforço é unidirecional, longo e orientado na direção do fluxo. ALBA [16], CARVALHO [15] e RESANA [71].

2.2.3 - Interface Fibra-Matriz

Um dos parâmetros importantes nos materiais compósitos é a interface entre o reforço e a matriz. A interface é a região onde ocorre o contato entre os componentes do compósito. A região interfacial é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início das

falhas, comprometendo o desempenho do compósito. Portanto, as propriedades individuais de cada componente do compósito na interface deve ser a mais adequada possível para otimizar a combinação das propriedades envolvidas. Considerando-se que os materiais do compósito são, em geral, muito distintos, é comum haver problemas de compatibilização interfacial. Em razão das diferentes naturezas das ligações químicas envolvidas e da diferença entre os coeficientes de expansão térmica, a adesividade na interface constitui um problema no desenvolvimento do compósito.

Dentre os vários mecanismos desenvolvidos para melhorar a propriedade de adesão na interface nos compósitos de matriz poliméricas, os agentes de acoplamento desempenham um fundamental papel na região interfacial, HAGE [6].

A interface influencia nas propriedades dos compósitos e a sua resposta a ambiente corrosivos e aquosos. Compósitos com interface fraca tem relativamente baixa resistência e rigidez, mas alta resistência à fratura, por outro lado, compósitos com interface forte tem alta resistência e rigidez, mas são frágeis. HULL [7].

A natureza da ligação entre a fibra e a matriz depende do arranjo atômico e propriedades químicas das fibras bem como da conformação molecular e constituição química da matriz polimérica.

Na interface a adesão entre a fibra e a matriz é fundamental para que possa haver o reforço do compósito. 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 de vidro e carbono, 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, mas contração da resina durante o processo de cura e expansão térmica da fibra e matriz, produzem tensões de compressão e cisalhamento na superfície.

O tratamento superficial do reforço com os chamados agentes de acoplamento é largamente utilizado. Em geral, estes agentes visam produzir uma ligação química entre a fibra e a matriz. Fibras de vidro, por exemplo, normalmente são modificadas com agentes de acoplamento silano e a superfície pode exibir propriedades aniônicas ou catiônicas dependendo dos óxidos usados no vidro e do pH da solução aquosa usada para aplicar o agente silano. O pH do silano permite obter uma melhor orientação das moléculas sobre a superfície do vidro, obtendo-se um ótimo efeito de acoplamento, que também envolve ligação química, pois a atração eletrostática sozinha não resiste muito à água.

2.2.4 - Compósito Poliéster - Fibra Vegetal

2.2.4.1 - Fibra Vegetal

O uso de fibra naturais de origem vegetal para a produção de materiais compósitos data, provavelmente, do princípio da nossa civilização,

quando se usava palha ou capim para reforçar tijolos de barro cru conhecidos como adobe. Com o advento do fogo, os tijolos de argila queimada passaram a substituir quase que completamente, os tijolos de adobe.

No passado, a principal utilização das fibras vegetais era na produção de cordas, barbantes, roupas, capachos e produtos artesanais. Com o surgimento das fibras sintéticas o consumo das fibras vegetais teve uma queda de cerca de 40%, D'ALMEIDA [8]. Nos últimos anos, a crise energética, o baixo grau de industrialização necessário para o processamento das fibras vegetais, sua abundância, baixo custo e os problemas causados pelo uso das fibras sintéticas ao meio ambiente, tem novamente despertado a atenção e interesse de pesquisadores em todo o mundo.

Apesar do grande número de pesquisas sendo executadas visando ampliar o seu uso, as fibras vegetais ainda não se apresentam com uma escolha automática para reforço de matrizes. Os principais problemas observados sobre tal uso estão relacionados com o baixo módulo de elasticidade, a alta absorção de água, a susceptibilidade à ataque de fungos e insetos, a durabilidade das fibras em meio alcalino, a variação das propriedades das fibras de mesmo tipo e a compatibilidade da interface fibra-matriz.

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

médias, TOLEDO [9].

A longa exposição das fibras vegetais a ambientes úmidos levam à sua decomposição biológica. Isso surge como resultado da desintegração gradual das lamelas, conduzindo à decoesão das paredes das células e das células últimas. A maioria dos ambientes agressivos conduzem a mecanismos de ataque químico. Eles causam deterioração da fibra atacando quimicamente as microfibrilas e/ou lamelas coloidais. Se são as microfibrilas que são afetadas, isso implica em ataque químico direto nas moléculas de celulose de que elas são feitas. Se são os colóides que são atacados, isto implica em ataque químico na lignina, pectina, hemicelulose e outros, TOLEDO [9].

As fibras naturais são divididas nos seguintes grupos:

- * Fibras vegetais;
- * Fibras de animais (lã, seda, cabelo) e
- * Fibras minerais (asbesto).

As fibras vegetais são divididas em:

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

Os diversos tipos de fibras vegetais são constituídos principalmente

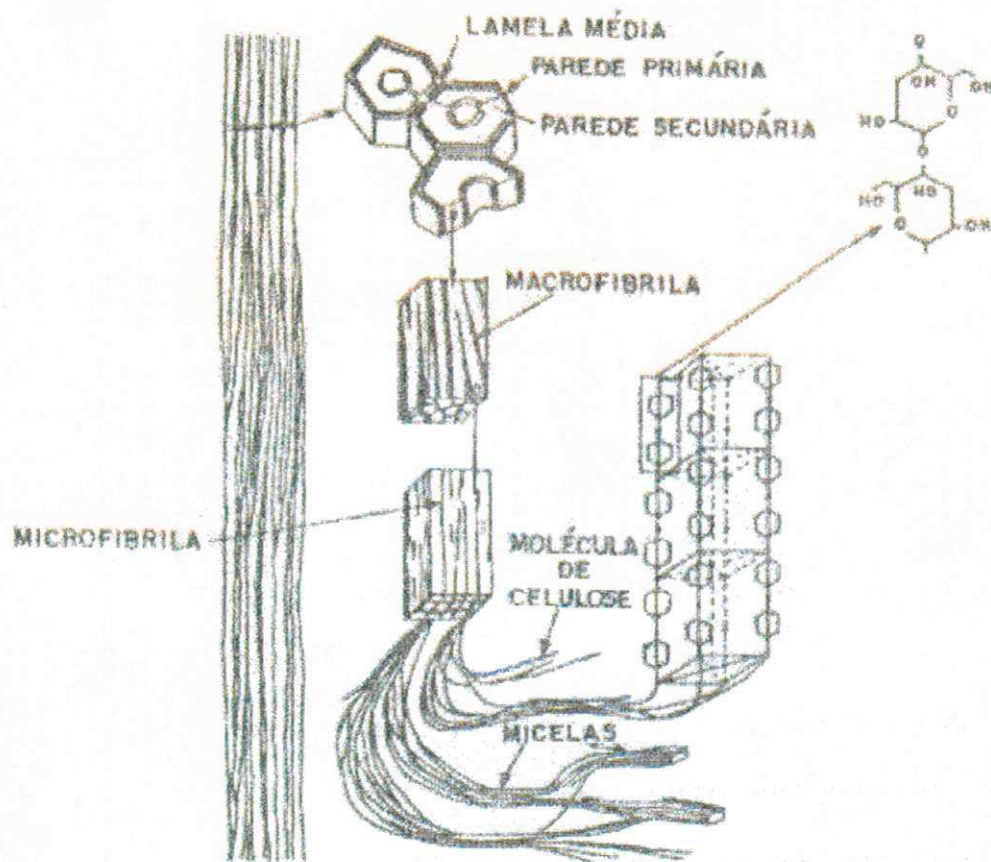


Figura 1 - Constituição estrutural geral das fibro-células, TOLEDO [9].

A seguir será feito uma abordagem sumária sobre a origem, composição e propriedade da fibra de juta, uma fibra vegetal oriunda do talo, utilizada neste trabalho como reforço na matriz poliéster.

2.2.4.2 - Fibra de Juta

As fibras de juta são extraídas das hastas da juta. O tipo *Corchorus capsularis* é cultivado em zonas de inundação e o *Corchorus olitorius* em zonas

mais altas. É uma planta das regiões tropicais, onde a média climática anualmente mantém a umidade relativa alta, com temperaturas constantes entre 293 K e 298 K, ERHARDT et al [11]. São originárias da Índia, onde são cultivadas em larga escala, principalmente na província de Bengala. São herbáceas, atingindo até quatro metros de altura e, segundo alguns botânicos, tem sua origem também no norte da África.

O crescimento completo do vegetal leva de 5 a 6 meses a partir do nascimento da planta, cujo caule quando maduro, é cortado quase rente ao solo, ficando a secar durante 3 ou 4 dias. Depois de retirados seus ramos e suas folhas é posto a curtir, mergulhando-se em água estagnada, procedendo-se o decorticamento, de forma que seja evitada a ruptura das fibras. A seguir, separam-se as fibras do liber da parte lenhosa do caule, sendo postas a secar depois de bem lavadas em água corrente. A secagem é feita rapidamente ao sol, reunindo-se as fibras em manojos e feixes que são enfardados para a exportação em fardos de 180 a 200 Kg, RIBEIRO [12]. A juta foi trazida para o Brasil, para São Paulo, por volta de 1920, inicialmente sem sucesso e posteriormente levada para a região amazônica de Parintins. Depois de alguns anos obteve-se uma variedade razoavelmente adaptada e conhecida como juta branca ou Oyama, em homenagem ao japonês Riyota Oyama. De Parintins expandiu-se para outras regiões.

A estrutura do caule da juta é semelhante à do linho. As fibras são fortemente lignificadas e esta particularidade reduz a resistência das fibras quando sujeitas à ação da luz, calor e umidade. As fibras são obtidas colocando-se os caules em água corrente ou de fraca correnteza. Ficam assim expostas à

maceração em água fria. A separação das fibras é feita a úmido, nos tanques de maceração. O lenho é batido com macetes e quebrado em pedaços curtos, depois em movimento circular é expelido do feixe da fibra, ERHARDT et al [11].

De acordo com BARKAKATY [13] as fibras celulósicas como sisal, juta e palmeira, contêm 50 a 78% de celulose, 10 a 24% de hemicelulose e pectinas, 8 a 13% de lignina, com baixas percentagens de ceras e resíduos minerais. A seguir serão apresentadas, na tabela 2, algumas características e propriedades da juta.

Tabela 2 - Características e propriedades da fibra de juta.

Comprimento da fibra	Fibra técnica 1,2 a 3,0 m.
Diâmetro da fibra	Aproximadamente 25 μm .
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 ácidos e lixívias	Muito sensível a ácidos. Lixívias não prejudicam.
Cor	Em geral cinza para marrom-avermelhado.
Superfície da fibra	Lisa.
Teste de combustão	Arde como outras fibras vegetais.

2.2.4.2.1 - Estrutura Química

Os três principais constituintes da juta são α -celulose, hemicelulose e a lignina. Também estão presentes na fibra pequenas quantidades de resíduos minerais e ceras, substâncias nitrogenosas e minerais. Como observado em outros produtos naturais, a composição da fibra de juta é inclinada a variar ligeiramente com o tipo de solo, umidade, época do plantio e variedade da planta. Na tabela 3 pode-se observar a composição de um certo tipo de fibra de juta.

Tabela 3 - Composição da fibra de juta % (princípio de secagem em estufa)

Alfa celulose	64.0;
Hemicelulose	23.0;
Lignina	11.0;
Componentes solúveis em água	1.7;
Resíduos Minerais e Ceras	0.3.

A celulose na juta, que forma o principal componente estrutural da fibra, figura 2, aparenta ser quimicamente idêntica à de outras fibras vegetais como o algodão, rami, linho, e outros. As moléculas da celulose consistem de longas cadeia, cerca de 5000 unidades de D-glucose, formando uma única molécula.

A cadeia molecular é arranjada em feixes dentro de fibrilas

submicroscópicas, que são parcialmente cristalinas ao natural e formam uma espiral na célula.

A hemicelulose consiste principalmente de cadeias unitárias de D-xilose (em torno de 150 por molécula) com um caráter não cristalino. As ramificações consistem de resíduos de 4-O-Metil ácido glicurônico fixadas aproximadamente a 700 unidades de xilose na ramificação da hemicelulose e são responsáveis pelo caráter ácido da juta e sua afinidade natural para corantes básicos, DUNDEE [14].

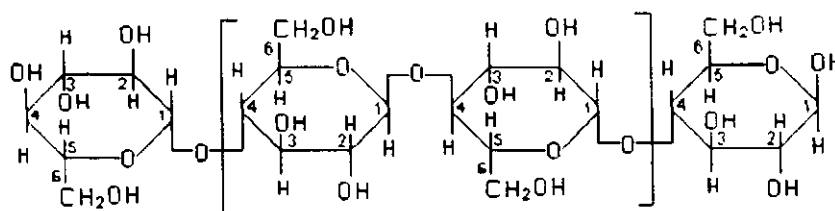


Figura 2 - Estrutura química da celulose.

A Lignina, o terceiro componente principal, é conhecido como uma substância de alto peso molecular composta de unidades relativamente simples, figura 3. Estudos comparativos de juta, algodão e outras fibras sugeriram que na presença da lignina a resistência da fibra aumenta em relação ao prejuízos microbiológicos, DUNDEE [14].

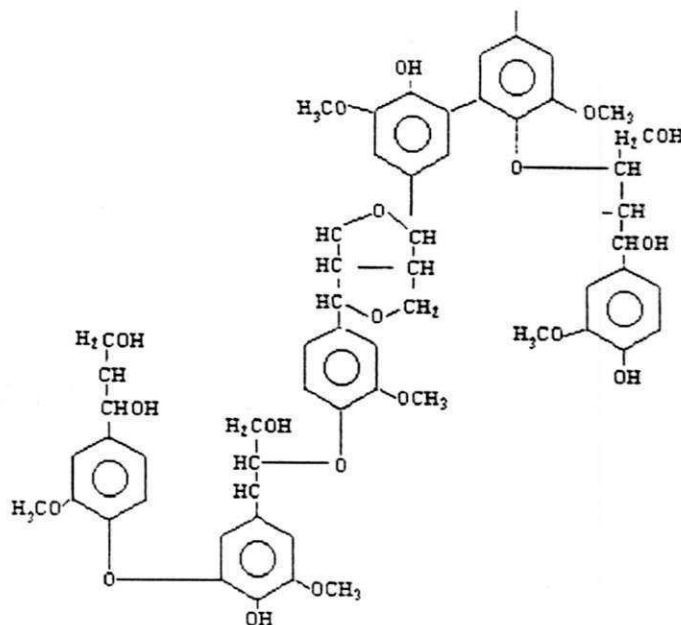


Figura 3 - Estrutura química da lignina.

2.2.4.2.2 - Propriedades da Fibra de Juta

A resistência à tração da fibra de juta varia consideravelmente, tendo valores na faixa de 240 - 550 MPa. A fibra de juta apresenta um módulo de elasticidade que varia na faixa de 17,4 - 32 GPa, TOLEDO [9]. A dispersão desta propriedade está relacionado com alguns fatores, tais como: época do plantio, solo, colheita e outros.

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

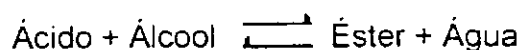
2.2.4.3 - Resina Poliéster.

Existem dois tipos de resinas plásticas disponíveis no mercado, classificadas conforme sejam ou não fundidas pelo calor: resinas termoplásticas e termofixas.

As resinas termoplásticas apresentam-se no estado sólido à temperatura ambiente, sendo processadas ou moldadas por meio de aquecimento, fusão e resfriamento, em moldes apropriados. Este procedimento pode ser realizado várias vezes, o que permite a reciclagem do material. Apresentam excelente resistência química, porém suas propriedades mecânicas deixam a desejar em temperaturas moderadamente elevadas.

As resinas termofixas são fornecidas normalmente na forma física de líquido viscoso, que após a adição de produtos químicos apropriados (aceleradores, catalisadores), transformam-se do estado líquido para sólido. Tal transformação é definida como cura ou polimerização e é irreversível.

As resinas poliéster pertencem a uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos utilizados, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular, CARVALHO et al [15]. A reação de esterificação se dá da seguinte forma:



reação de esterificação

Desta maneira moléculas de diácido e de dióis originarão o poliéster.

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, o que caracteriza a flexibilidade dos produtos obtidos. Podem ser utilizados com ou sem reforço, e seu emprego é bem diverso como, por exemplo: filmes, fibras sintéticas plastificantes, tampas de tanque de combustível, e outras.

O poliéster insaturado é obtido pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um diol, resultando num produto, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluído num monômero vinílico, inibido, para facilitar sua utilização. Inicialmente encontra-se no estado líquido e após a adição de um agente de cura, ocorre a transformação para o estado sólido, caracterizando uma estrutura termofixa, onde o monômero vinílico polimerizará, unindo as diversas cadeias poliéster. O produto termofixo é insolúvel e infusível não podendo, portanto, ser reprocessado. Estas resinas poliéster podem ser utilizadas com e sem reforço.

2.2.4.3.1 - 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, e propileno glicol,

respectivamente.

Cada um desses componentes tem sua função básica na obtenção da resina poliéster. O ácido insaturado fornece os pontos reativos para as ligações cruzadas; o ácido saturado determina o grau de espaçamento ou concentração das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia do poliéster, e o glicol, naturalmente, proporciona os meios para a esterificação e a ponte entre os ácidos para formar o polímero. O monômero 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.

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 saturado, o ácido ortoftálico, figura 4.

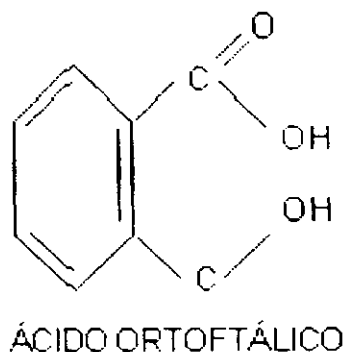


Figura 4 - Estrutura química do ácido ortoftálico.

A resistência química de um poliéster está ligada principalmente ao índice de acidez, quantidade de grupos ésteres formados e densidade das ligações cruzadas, ALBA [16].

Quando se produz uma resina poliéster insaturada partindo-se do ácido ortoftálico, figura 5, 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 ácido é muito difícil de ser produzida com baixo índice de acidez, sem se 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.

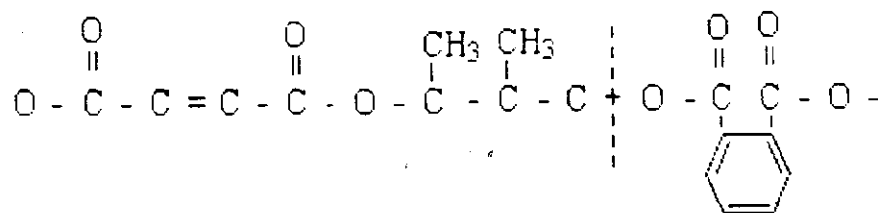


Figura 5 - Estrutura química da resina poliéster ortoftálico.

Poliéster Isoftálico.

Quando o ácido ortoftálico é substituído pelo ácido isoftálico, figura 6, os radicais encontram-se mais distantes entre si, não havendo interferência

mútua na formação da cadeia do polímero, permitindo assim, a obtenção de cadeias poliméricas mais longas, sem adição excessiva de glicol.

As moléculas com cadeias mais longas, conferem ao produto final uma maior resistência ao impacto. Por isso, uma resina poliéster produzida com ácido isoftálico tem maior capacidade de absorver um impacto do que aquela produzida com ácidos ortoftálicos, figura 7.

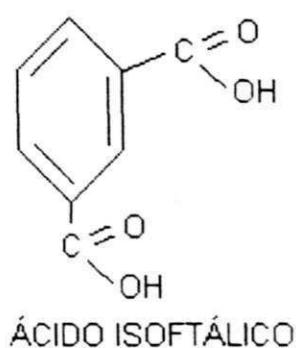


Figura 6 - Estrutura química do ácido isoftálico.

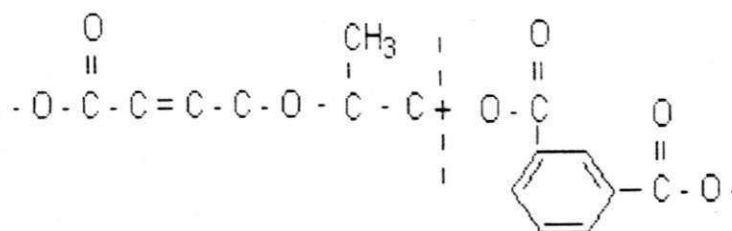


Figura 7 - Estrutura química da resina poliéster isoftálico.

O baixo conteúdo de glicol livre, torna-a um produto não sensível à água, o que lhe confere as propriedades finais de resistência química, ALBA [16].

2.2.4.3.2. - Processo de Cura da Resina Poliéster.

A cura é a transformação de uma estrutura linear ou ramificada a 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 tipos e quantidade de carga e aditivos, CARVALHO et al [15].

Normalmente, são usadas concentrações de peróxido variando de 0,5 a 2% do peso da resina. No caso dos promotores, esta concentração poderá variar de 0,05 a 0,3%. Altas concentrações de promotores podem adversamente afetar a cura final da resina. É relevante informar, os peróxidos orgânicos não podem ser misturados diretamente com os promotores. Nestas condições, poderá ocorrer uma violenta decomposição, explosão e fogo, CARVALHO et al [15].

2.2.4.3.3 - Agentes Modificadores Superficiais

A literatura reporta diversas potencialidades e limitações do uso de fibras vegetais como reforço em matrizes poliméricas. Encontra-se informações sobre as características individuais dos diferentes tipos de fibras; suas características de processamento e potencialidades de aplicação; suas propriedades mecânicas, e seus custos. Além disto, o efeito de tratamentos superficiais das fibras nestas propriedades, também tem sido reportados. Em que pese as diferenças de comportamento e de propriedades das fibras vegetais em função do seu tipo, composição química, método de processamento e forma de uso (fibra singela, cordões, tecidos, mantas), há uma série de semelhanças e problemas no seu emprego como agente reforçante em compósitos poliméricos, que decorrem da sua natureza química. Muitos problemas ou desvantagens no uso de fibras vegetais em compósitos poliméricos são comuns e independem do tipo e origem da fibra empregada, MOHANTY e MISRA [17].

As fibras vegetais são bastante higroscópicas (~14 - 40%) e suas superfícies são incompatíveis com a maioria das resinas poliméricas. Estes

fatores favorecem a formação de vazios ou porosidade e de interfaces fracas, resultando em compósitos com propriedades mecânicas pobres. Portanto, pesquisas têm sido conduzidas com o propósito de minimizar estas deficiências e aperfeiçoar as propriedades mecânicas dos compósitos. Ao se escolher métodos de modificação superficial de fibras vegetais, é necessário que as modificações sejam eficientes e de baixo custo, FLINN [4].

Em geral, busca-se modificações efetivas e de baixo custo, para produzir produtos baratos, com boas propriedades. Por outro lado, a substituição da fibra sintética por fibra natural pode não ser interessante, pois as fibras vegetais se comparada com as sintéticas, apresentam baixa resistência.

Entre os métodos empregados para modificações superficiais das fibras vegetais, os mais populares são a copolimerização por enxertia, meios químicos e revestimentos superficiais. AMINABHAVI e CASSIDY [18]. Na literatura encontram-se diversos trabalhos sobre as modificações das fibras vegetais com enxertia de poliácridonitrila (PAN) e agentes de acoplamentos do tipo silano. No capítulo 3 mostraremos alguns trabalhos (CARVALHO e RUDIN [46], CORAN e PATEL [48], PRASAD et al [51] e outros) com modificações superficiais das fibras vegetais.

O presente trabalho visa dar continuidade às pesquisas que tratam das propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras vegetais realizados no Laboratório de Polímeros no DEMa e Laboratório de Ensaio Mecânicos no DEM da UFPB. Em estudos anterior, BATISTA [19] investigou o efeito de diversos tratamentos superficiais (a diferentes teores) nas propriedades mecânicas de compósitos Poliéster - Juta na forma de tecido e

concluiu que , dentre os sistemas e teores investigados, melhores propriedades mecânicas eram obtidas quando os tecidos eram tratados com uma solução de pré-polímeros derivados do óleo de mamona com grupos funcionais OH, NCO ou uretanos daí obtidos. As propriedades mecânicas de compósitos Poliéster - Juta reforçados com cordões de diferentes diâmetros serão determinadas em função do teor de fibra e do tipo de modificador superficial utilizado (poliol, pré-polímero isocianato ou uretano). BATISTA [19], concluiu que os melhores desempenhos mecânicos eram obtidos quando as fibras de juta eram tratadas com um teor de 10% em volume, de modificador. No presente estudo, este será o teor de modificador superficial empregado e, as propriedades mecânicas e tenacidade do compósito Poliéster - Juta em função do tipo de modificador serão investigados.

2.3 - MECANISMO DE FRATURA

2.3.1 - Introdução

Nos últimos anos a tenacidade, além da resistência mecânica convencional, tornou-se um parâmetro mais importante na caracterização do comportamento mecânico de materiais homogêneos e heterogêneos. A resistência dos materiais compósitos à fratura depende da distribuição e tamanho das falhas, e, como consequência, do tamanho e da forma da amostra e, portanto, não é na realidade uma propriedade do material. Entretanto, com o conhecimento da forma da amostra e do tamanho da falha e/ou defeito, podemos a partir da resistência do material determinar o fator de intensidade de tensões

crítico (K_C) e/ou a taxa de relaxação de energia crítica (G_C), energia ou força de Griffith. K_C e G_C representam realmente propriedades inerentes do material. Para este propósito corpos de provas com entalhes ou pré-trincas de comprimento definido, ao invés de defeitos naturais, são usados nos ensaios de tenacidade.

O que é comum às diferentes definições de tenacidade é que elas caracterizam a resistência do material à fratura. Elas se dividem de acordo com o estágio de propagação da trinca:

- 1º - Fase de início e/ou iniciação da trinca;
- 2º - Fase de crescimento lento da trinca;
- 3º - Fase de transição instável do crescimento da trinca;
- 4º - Fase de crescimento instável da trinca e
- 5º - Fase em que a trinca para de propagar ("crack arrest").

O principal propósito da mecânica da fratura é caracterizar a situação física nas proximidades da ponta da trinca e, então, providenciar meios para prognosticar a progressão da falha e/ou dano, com base nas propriedades do material e na carga externa, LAUKE, SCHULTRICH e POMPE [20].

De conformidade com a mecânica da fratura, a resistência é governada por dois fatores: as propriedades da amostra isenta de falhas (qualquer espécie de defeito que possa ser caracterizado como trinca); e a possibilidade de falhas preexistentes (trincas). A origem do último fator está além do escopo da mecânica da fratura. Assim sendo, ela se ocupa com os estágios de

trinca 2º a 5º, citados acima, LIEBOWITZ [21], BROECK [22], CHEREPANOV [23] e POMPE et al [24].

A mecânica da fratura linear elástica (LEFM) tem como objetivo o estudo da propagação instável de trincas agudas, sob comportamento frágil de fratura. O material circundante à falha deforma-se elasticamente, exceto uma pequena região plástica em torno da ponta da trinca. Neste caso, a transição para a propagação instável de trinca é descrita pelos parâmetros críticos de tenacidade, ou seja, o fator de intensidade de tensões crítico (K_{Ic}) e a taxa de relaxação de energia crítica (G_c) e/ou a energia de Griffith.

Materiais compósitos, por sua vez, mostram zonas consideráveis de dano na frente da ponta da trinca, comparáveis às zonas plásticas de materiais homogêneos. Estas zonas modificam o campo elástico de tensões em torno da trinca, necessitando-se da transição da mecânica da fratura linear elástica (LEFM) para a mecânica da fratura elasto-plástica (EPFM), através dos conceitos de Integral J, deslocamento da abertura da ponta da trinca (CTOD) e da curva de resistência (curva R).

A grande maioria dos trabalhos que tratam da tenacidade de materiais reforçados com fibras, usam os conceitos da mecânica da fratura linear elástica. Entretanto, nos últimos anos, têm surgido trabalhos que consideram o comportamento não linear das tensões na ponta da trinca.

A determinação dos parâmetros de tenacidade acontecem em dois níveis. Por um lado, considera-se o material anisotrópico e heterogêneo como material anisotrópico, mas homogêneo, com propriedades elásticas efetivas. Este

método permite a aplicação dos conceitos desenvolvidos para materiais homogêneos. Por outro lado, os processos microscópicos dentro dos materiais heterogêneos estão sendo considerados. Isto permite vislumbrar o mecanismo de falha e o papel dos parâmetros característicos dos materiais, tais como: propriedades estruturais (comprimento, orientação e fração volumétrica das fibras) e propriedades mecânicas dos componentes e da interface fibra-matriz., LAUKE, SCHULTRICH e POMPE [20].

2.3.2 - Mecânica da Fratura Aplicada a Compósitos Reforçados por Fibras

A resistência à trinca em compósitos reforçados por fibras pode ser caracterizada pelos conceitos desenvolvidos para materiais homogêneos.

Um método eficiente e muitas vezes usado, considera o somatório das contribuições de cada componente equivalente a uma energia efetiva de fratura, o que corresponde à aproximação da energia global. A relaxação de energia elástica durante o crescimento finito da trinca, em um elemento estrutural, é equacionada para diferentes espécies de energia consumidas. LAUKE, SCHULTRICH e POMPE [20]:

$$G_c = \sum \alpha_i (2 \gamma_i) \quad (1)$$

" γ_i " é a energia por superfície consumida para um processo especial de consumo de energia, ou seja: ruptura da fibra; escorregamento na interface matriz-fibra ou falha; etc. Na equação (1) " α_i " representa a fração de área α_i em que ocorreu o

consumo de energia γ_i (ruptura da fibra, ...). Entretanto, na aplicação dos conceitos da mecânica da fratura, as peculiaridade da heterogeneidade estrutural não devem ser esquecidas.

O problema consiste na resolução de pequenas estruturas, ao longo de um gradiente íngreme de tensão, antes da ponta da trinca. As condições para um crescimento infinitesimal de trincas, o processo básico para testar a estabilidade da trinca em materiais homogêneos, varia agora de acordo com a estrutura local. O crescimento de trinca que em média aparenta ser estável, pode ser composto de crescimento estável em uma fase e instável (fratura repentina) em outra. Então, parte da energia é relaxada como energia cinética, cuja existência geralmente é ignorada no balanço de energia envolvendo um incremento finito de comprimento de trinca, como é necessário na descrição de materiais heterogêneos. Isto implica na hipótese de que a energia carregada pelas ondas elásticas é, de alguma maneira reabsorvida pela ponta da trinca, movendo-se lentamente dentro de outro componente, transformando-se agora em energia superficial relevante à face da trinca.

Esta redistribuição de energia promove a fratura e, desta forma, a tenacidade à fratura, calculada sob estas condições, tem a característica de pertencer a uma banda inferior (K_{C^-}). Pelo outro extremo, assume-se que a energia excessivamente relaxada em algum lugar na frente da trinca não alimenta as áreas de pouca relaxação de energia, mas sim é completamente dissipada. Obviamente esta é uma situação que fornece uma menor propagação de trinca. A tenacidade à fratura, neste caso, representa e pertence a uma banda superior (K_{C^+}), para o campo macroscópico do fator de intensidade de tensões, LAUKE,

SCHULTRICH e POMPE [20].

Na realidade, K_c está entre as bandas inferior e superior, dependendo do material e da geometria do corpo de prova: $K_c^- \leq K_c \leq K_c^+$.

Para os compósitos a interpretação das quantidades do lado direito da expressão do fator de intensidade de tensões crítico, equação (2), apresenta dificuldades.

$$K_c = Y \cdot \sigma_c \sqrt{a} \quad (2)$$

Na equação (2), " Y " é o fator de forma, " σ_c " é a tensão crítica e " a " é o comprimento da trinca. Por outro lado, deve-se considerar que a resistência à trinca em um material heterogêneo, depende da direção de propagação da trinca. FRIEDRICH [25,26,27] considerou o último fato e usou o conceito de " K_c " para caracterizar a resistência à trinca de diversos termoplásticos reforçados com fibras curtas.

Nas figuras 8 e 9 pode-se observar a dependência de K_c com a direção de propagação de trinca (T - transversal e L - Paralela), para um material relativamente frágil (PET) e outro tenaz (policarbonato). Por outro lado, pode-se notar que a variação da tenacidade com o acréscimo de fração volumétrica da fibra depende fortemente das condições de deformação do material da matriz.

A analogia do laminado é uma aproximação adequada quando se considera os aspectos estruturais em mecânica de fratura. Este método é baseado na combinação de considerações micro e macromecânicas.

Um material compósito é subdividido em diferentes camadas com parâmetros estruturais variáveis (por exemplo, orientação da fibra). Após o cálculo das constantes elásticas efetivas para cada camada individual, a aproximação da mecânica da fratura linear elástica (LEFM) pode ser aplicada. A tenacidade à fratura do compósito é determinada através de superposição de efeitos. Esta aproximação foi usada principalmente para polímeros reforçados com fibras contínuas, HARRIS [28].

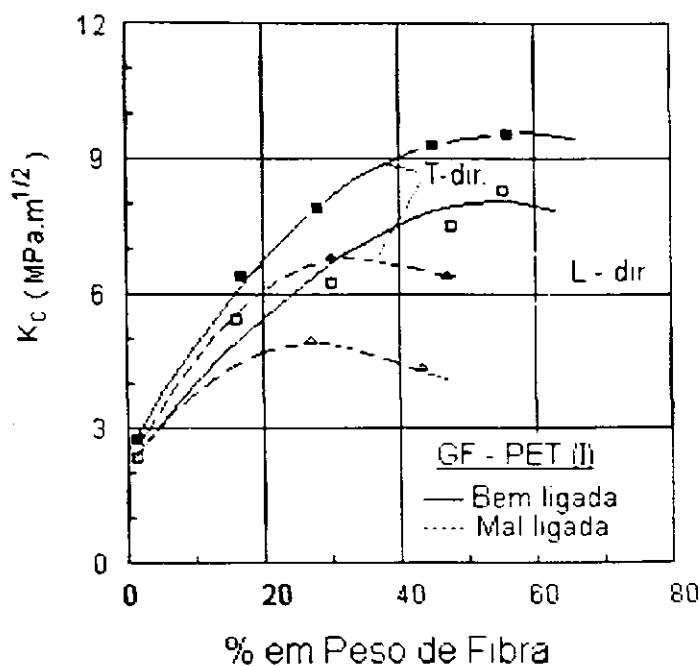


Figura 8 - Tenacidade à fratura (K_c) versus fração em peso de fibra de vidro em função da direção de propagação da trinca (T - Transversal à trinca e L - Paralela). GF-PET (I). Compósito com diferente qualidade de ligação na interface matriz - fibra.

Entretanto, este método foi também aplicado com sucesso a

compósito reforçados com fibras curtas, TSANAS e KARDOS [29]. Polímeros reforçados com fibras curtas geralmente apresentam um crescimento lento de trinca, antes que ocorra a instabilidade e, portanto, um parâmetro simples tal como K_C ou K_Q não é apropriado para caracterizar o comportamento total da fratura.

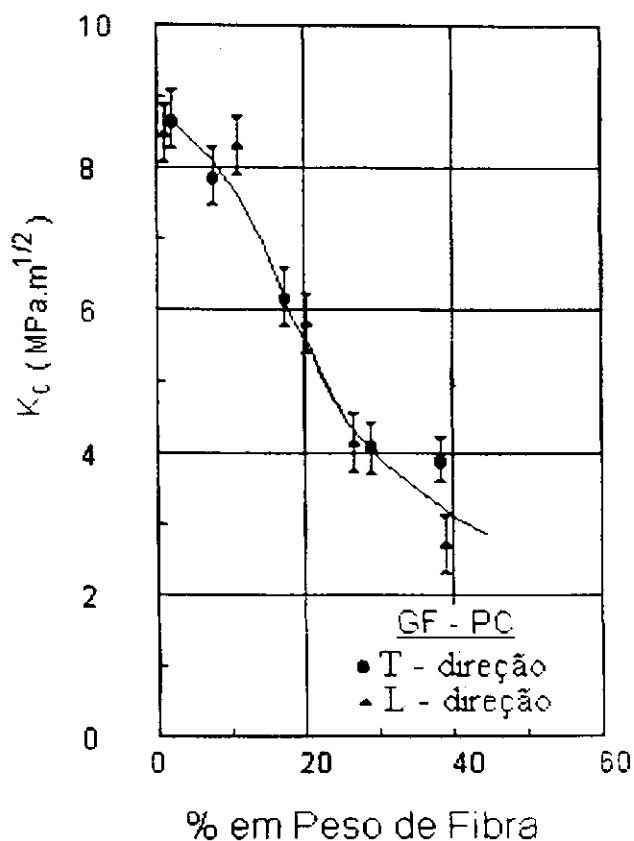


Figura 9 - Tenacidade à fratura (K_C) versus fração em peso da fibra de vidro em função da direção de propagação da trinca (T - Transversal à trinca e L - Paralela). GF - PC. Compósito com matriz tenaz.

O método de K_Q foi introduzido em mecânica da fratura, para que se pudesse considerar o efeito de pequenas não linearidade nas curvas de tensão versus deflexão, BROECK [22], isto é, a carga máxima P_{max} como valor crítico é

substituída por uma carga modificada P_0 . Normalmente, esta carga é definida no ponto de interseção de uma secante (traçada com uma inclinação 5% menor em relação a parte linear da curva de carga versus deflexão do ponto de aplicação da carga) à curva de carga versus deflexão do ponto de aplicação de carga.

Por esta razão o conceito de curva de resistência (curva R) foi tanto usado por GAGGAR e BROUTMAN [30], quanto por AGARWAL e GIARE [31]. Ambos trabalharam com compósitos de epóxi reforçados com fibras curtas. Verificaram que os resultados são adequados para comparar diferentes características dos compósitos, entretanto, falham na caracterização da tenacidade, como um parâmetro do material, porque dependem do comprimento inicial de trinca.

Em adição aos conceitos de campo de tensões, os critérios de energia crítica (G_c) e da Integral J também tem sido usados para caracterizar o comportamento à fratura de compósitos, GUESS e HOOVER [32], GRELLMANN [33] e HOFFMAN et al [34]

Esta simples revisão demonstra que a determinação experimental de um valor real para a tenacidade à fratura, de materiais heterogêneos, é um problema bastante complexo.

2.3.3 - Mecanismo de Tenacidade à Fratura e Dissipação de Energia.

O processo de fratura de compósitos reforçados por fibras é caracterizado pela formação de diferentes tipos de superfícies de fratura. A fratura

ocorre através das fibras e da matriz e ao longo das interfaces. De acordo com o modelo de OUTWATER e MURPHY [35], a trinca inicia nas extremidades das fibras e, em seguida, propaga-se ao longo da interface matriz - fibra. Por outro lado, é possível também que a trinca desenvolva-se a partir da fibra para dentro da matriz, CURTIS et al [36]. Este comportamento é caracterizado por diferentes modos de propagação de trinca:

- a trinca provoca a fratura das fibras vizinhas ou, então, circunda-as;
- a trinca relaxa através do mecanismo de descolamento em locais distantes da trinca principal.

Em um dado compósito, o modo de fratura acima é determinado seja pela ductilidade da matriz seja pela forma com que a matriz reage diante da alta concentração de tensões na frente da trinca, ou seja, de modo frágil ou por escoamento plástico. Para o primeiro caso (ou, geralmente, se a deformação de fratura da matriz é atingida antes que ocorra a ruptura da fibra), diversos mecanismos de dissipação de energia foram propostos, os quais podem atuar no compósito em conjunto com os que atuam nos componentes. ou seja:

- 1º puxamento das fibras ("pull out"), PIGGOTT [37];
- 2º modo I de descolamento, distante da ponta da trinca, MARSTON et al [38];
- 3º modo II de descolamento, após a fratura da matriz. OUTWATER e MURPHY[35];
- 4º relaxação de tensões, PIGGOTT [39];

5º fricção após o descolamento, KELLY [40] e HARRIS et al [41].

O mecanismo de dissipação de energia atuante em um compósito com fibras depende principalmente do comprimento das fibras. Alguns destes mecanismos não atuam em compósitos com fibras curtas (pelo menos de forma como foram apresentados nos trabalhos citados) se as fibras forem menores que um certo comprimento crítico (a tensão de fratura não é atingida).

Para compósitos com fibras contínuas, HARRIS [42] propôs o mecanismo de fratura apresentado na figura 10.

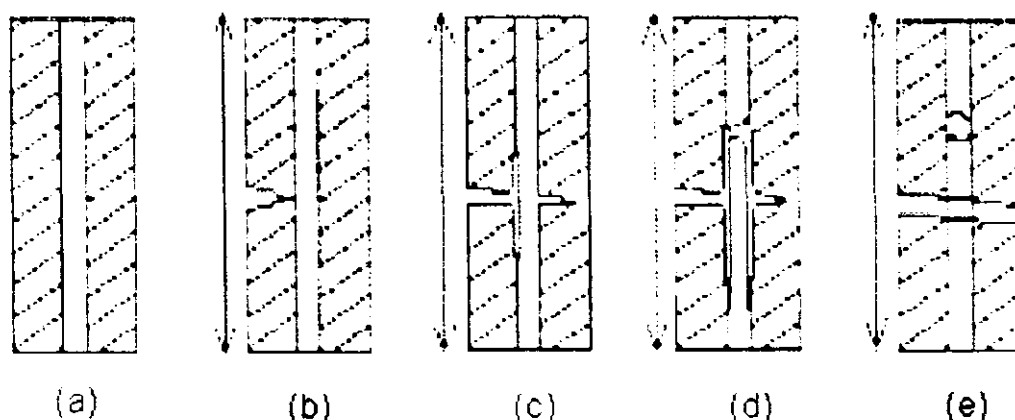


Figura 10 - Representação esquemática dos estágios de crescimento de trinca em um compósito com fibras: (a) a fibra é presa pela resina em um compósito não trincado; (b) a fratura da resina é detida pela fibra; (c) o cisalhamento interfacial e a contração lateral da fibra provoca o descolamento e a seguir o incremento no comprimento da trinca (as fibras armazenam energia de deformação elástica nas regiões descoladas); (d) após considerável descolamento, as fibras quebram em um ponto fraco dentro da resina e a seguir ocorre o crescimento

de trinca; (e) a extremidade quebradas da fibra deve ser puxada para fora, em face da força friccional da resina, se a separação total da amostra estiver para ocorrer, HARRIS [42].

WELLS e BEAUMONT [43] concluíram que os mecanismos de fratura 3º, 4º e 5º, acima citados, quantificam a mesma variação de energia. Eles resumiram o processo de dissipação de energia das fibras, (é de tal forma suficiente, que a tensão de tração atuante nas mesmas, alcança a tensão de resistência da fibra. (σ_F^u)), em três mecanismos: puxamento das fibras, energia superficial e um envolvendo variações na energia de deformação elástica das fibras. As energias de dissipação são determinadas de maneira compreensível nos trabalhos de WELLS e BEAUMONT [44].

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

O emprego de fibras vegetais como elemento de reforço em compósitos de matrizes poliméricas tem recebido grande atenção nas últimas décadas devido às boas características de resistência e módulo. Fibras de juta, sisal, coco e abacaxi, entre outras, aparecem como materiais promissores para este fim, pois são abundantes, de baixo custo, possuem baixo peso específico e alta resistência e módulo, se comparadas aos plásticos.

O Brasil não só possui uma flora diversificada como também grande extensão territorial adequada ao plantio, o que viabiliza a exploração e aproveitamento destes recursos naturais. A fibra de juta é muito abundante na região norte e é mais uma razão para estudá-la com possibilidade de aplicações mais nobres.

Uma análise da literatura sobre a potencialidade e limitações do uso das fibras vegetais como reforço para matrizes poliméricas, enfatiza aspectos tais como: características individuais das diferentes fibras; características dos processamentos; propriedades mecânicas e custo destes compósitos como também o efeito do tratamento superficial nestas propriedades. Estes estudos mostram que muitos dos problemas encontrados no uso das fibras vegetais como agentes reforçantes para matrizes poliméricas, são comuns e independentes do tipo e origem das fibras, FLINN [4] e HULL [7].

Um dos objetivos de reforçar os termoplásticos com materiais celulósicos é obter-se produtos moldáveis com alto teor de carga a um custo

relativamente baixo.

Dentre os métodos empregados para a modificação superficial de fibras vegetais, os mais populares são: copolimerização por enxertia, meio químico e revestimento superficial, BAER e MOET [45].

Critério semelhante é aplicado para a modificação das fibras por reações químicas já que a acetilação e a irradiação destas fibras são populares.

O revestimento superficial da fibra também segue estes critérios, embora seja um método naturalmente simples e com baixas quantidades de produtos.

CARVALHO e RUDIN [46] analisaram oito métodos de reações de enxertia de metil metacrilato em polpa de madeira iniciadas, por radicais livres. Os autores usaram os seguintes requisitos para a escolha da reação: baixo custo, alta conversão do monômero para polímero, reação rápida e alta eficiência de enxertia. Os resultados mostraram que o peso molecular do produto é dependente do tipo de iniciador, da frequência de enxertia e da temperatura de ensaio. A frequência da enxertia não foi a máxima desejada. Dentre os procedimentos utilizados, em média, o iniciado por sulfato ferroso foi o mais efetivo entre os métodos de enxertia analisados.

SAMAL e BHUYAN [47] investigaram as propriedades das fibras da folha do abacaxi quimicamente modificada (PALF). Os métodos empregados na modificação química da fibra foram: a mercerização, cianoetilação, oxidação e copolimerização de enxertia com iniciador redox de acrilonitrila com variação do monômero, iniciador e concentração ácida sob vários intervalos de temperaturas

e reações. A modificação da fibra foi caracterizada por análise de infravermelho e medida da viscosidade. Os autores concluíram que a umidade pode ser significativamente reduzida por ambas as técnicas, a cianoetilação e cianoetilação seguida de enxertia. A modificação da fibra de folha do abacaxi pode servir como um reforço de resina para uma fabricação de baixo custo. A resistência tênil foi moderadamente aumentada por enxertia de acrilonitrila e cianoetilação, apresentando somente um leve aumento no módulo. A análise termogravimétrica mostra que na fibra de folha do abacaxi a enxertia com acrilonitrila leva a uma maior estabilidade térmica.

CORAN e PATEL [48] analisaram o tratamento superficial com isocianato com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos de poliolefinas reforçada com base celulósicas. ZADORECKI et al [49,50] estudaram o efeito de outros agentes de acoplamento não convencionais, isto é a tricloro triazina e a dimetilmelamina, nas propriedades do compósito termoplástico reforçado com fibra da juta. Os autores concluíram que estes agentes são capazes de produzirem ligações covalentes entre a fibra celulósica e a matriz polimérica, melhorando o desempenho mecânico e reduzindo a sensibilidade à água.

PRASAD et al [51] estudaram o efeito do tratamento alcalino da fibra de coco nas propriedades mecânicas dos compósitos Poliéster - Coco. Concluíram que os tratamentos resultaram em modificações na superfície da fibra, elevando a molhabilidade e prevenindo a flotação e segregação da fibra de coco no compósito. A fibra foi tratada por 72 e 96 horas, o que resultou em 10 a 15% de acréscimo de resistência tênil, com 40% de aumento do módulo e 90%

de aumento da resistência interfacial com a matriz. A resistência à flexão, o módulo e a resistência ao impacto do compósito reforçado por fibra com tratamento alcalino, foi 40% maior do que o compósito reforçado com a mesma fração de fibra não tratada.

CHAWLA et al [52] fizeram um estudo comparativo das propriedades mecânicas de compósitos Poliéster - Sisal com aqueles obtidos com fibra de vidro, carbono e Kevlar-29. Os autores concluíram que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçado com fibra de sisal foram superiores às da matriz. O módulo de elasticidade e a tensão de ruptura cresce com aumento da fração volumétrica das fibras. Os compósitos reforçados com a fibra de sisal tem suas limitações devido a fraca interação da interface fibra-matriz, entretanto, se mostram promissores para aplicações específicas.

SATYANARAYANA et al [53] verificaram a possibilidade de utilizarem fibras de coco, banana e algodão na fabricação de compósitos, avaliando as propriedades mecânicas e a resistência à intempérie. Concluíram que estes compósitos têm propriedades mecânicas inferiores às dos compósitos reforçados por fibra de vidro e que sua exposição às intempéries por 6 meses não produz nenhum dano significativo.

RAJ et al [54] estudaram o efeito do tratamento superficial no polipropileno (PP) reforçado por polpa quimi-termo-mecânica (CTMP) e pó de madeira. Nos tratamentos químicos foram empregados os seguintes agentes de acoplamento: poli (metileno (polifenil isocianato)), agente silano e epolene. O polipropileno reforçado com fibra de madeira tratada superficialmente apresenta um aumento na resistência tênsil. O tratamento da fibra não influenciou de

maneira significativa o módulo de elasticidade do compósito.

MALDAS et al [55] estudaram o efeito do tratamento do poliestireno (PS) reforçado com fibra vegetal Aspen na forma de polpa quimi-termo-mecânica (CTMP), nas propriedades mecânicas do compósito. Foram empregados como agentes acoplantes o poli (metileno (polifenil isocianato)) e o silano. Os resultados indicam que o tratamento com o poli (metileno (polifenil isocianato)) foi eficiente, enquanto que os compósitos reforçados por fibras tratadas com o agente silano apresentaram valores inferiores nas propriedades mecânicas.

CLARK e ANSELL [56] investigaram as propriedades mecânicas e a estabilidade à intempéries de um compósito híbrido reforçado com fibra de juta e fibra de vidro, produzido pelo processo manual (hand lay up) com matriz poliéster. Os autores concluíram que o laminado híbrido tem uma maior tenacidade quando comparada ao compósito convencional reforçado por fibra de juta e é mais resistente às intempéries, quando a fibra de juta é colocada entre tecido de fibra de vidro.

SRIDHAR et al [57] estudaram as propriedades de tração e flexão de compósitos poliéster reforçado por fibra de juta uni e bidirecionais, como também compósitos híbridos com fibra de juta e fibra de vidro na matriz poliéster. bem como, o efeito de um tratamento superficial nas fibras por revestimento com lignina. Os autores mostraram que o tratamento das fibras não afeta as propriedades mecânicas de flexão e tração, mas reduz o consumo de resina. A tabela 4 apresenta os valores de resistência à tração e do módulo de elasticidade do compósito poliéster reforçado por fibra de juta com e sem revestimento. A tabela 5 mostra os valores de resistência à flexão e do módulo de flexão. Os

autores concluíram que os compósitos com reforço uni e bidirecional aumenta a resistência à tração em 3 e 1,5 vezes, respectivamente, em relação a resina.

Tabela 4 - Propriedades de tração de compósitos Poliéster - Juta reforçados uni e bidirecionalmente.

Amostras	Direção	σ_R (MPa)	E (GPa)
Sem tratamento	Unidirecional	156,4	8,37
	Bidirecional	71,3	5,14
Com tratamento	Unidirecional	134,6	7,04
	Bidirecional	70,6	3,08

Tabela 5 - Propriedades mecânicas de flexão de compósitos Poliéster - Juta reforçados uni e bidirecionalmente.

Amostras	Direção	σ_T (MPa)	G (GPa)
Sem tratamento	Unidirecional	168,9	7,25
	Bidirecional	159,3	8,90
Com tratamento	Unidirecional	164,1	9,71
	Bidirecional	139,3	15,68

O compósito híbrido tem boas propriedades mecânicas, em relação

ao reforçado com fibra de juta a um custo de 2/3 menor do que o reforçado com fibra de vidro. O revestimento da fibra de juta com lignina reduz a quantidade de resina empregada na fabricação do compósito, enquanto que as propriedades de tração e flexão não são afetados pelo tratamento.

SEMSARZADEH e AMIRI [58] estudaram o efeito interfacial no compósito poliéster insaturado reforçado com fibra de juta. O pré-tratamento da fibra de juta com tetrahidrofurano, poliacetato de vinila e ácido acrílico nas propriedades de impacto, tração, absorção d'água, como também as reações químicas ocorridas no sistema, foram estudados. Os autores concluíram que o tratamento com tetrahidrofurano levou a um decréscimo nas propriedades de impacto e absorção d'água. As propriedades dos compósitos pré tratados com poliacetato de vinila tiveram uma melhora limitada, enquanto que os tratados com ácido acrílico apresentaram altas propriedades mecânicas e baixa absorção d'água.

CARVALHO et al [59] e ARRUDA [60] estudaram as propriedades mecânicas de compósitos Poliéster - Juta reforçados por tecido e cordões de fibras de juta. Analisaram o efeito do tratamento superficial da fibra de juta nas propriedades mecânicas do compósito, usando o agente de acoplamento silano e imersão em meio ácido com vários intervalos de tempo, tabela 6. Concluíram que o tratamento superficial da fibra de juta com silano é ineficiente para o sistema e a imersão por 3 horas com hipoclorito de sódio provocava um leve aumento nas propriedades mecânicas do compósito e, um empobrecimento destas propriedades quando a fibra ficava imersa por um longo tempo. Verificaram um aumento na resistência à tração e no módulo com o aumento da fração

volumétrica das fibras brutas.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas de tração do compósito Poliéster - Juta.

Tipos de Tratamentos	σ (na ruptura) (MPa)	σ (teórica) (MPa)	ϵ (%)	E (medido) (GPa)	E (teórico) (GPa)
CF	46,66	34,61	2,78	2,39	1,53
CFL3	25,29	26,90	-	-	1,95
CFL20	39,20	32,03	2,79	1,16	2,04
CFSi	41,35	33,17	3,13	1,45	3,24
CG	50,67	48,11	2,09	3,38	3,19
CGL3	58,72	47,47	2,16	3,23	3,19
CGL20	43,64	47,47	2,67	1,82	3,19
CGSi	50,81	47,40	3,17	1,71	3,19

Tabela 7 - Propriedades mecânicas de flexão do compósito Poliéster - Juta.

Tipos de Tratamentos	σ_f (MPa)	G (GPa)	Δ (mm)
CF	75,17	3,69	-
CFL3	-	-	-
CFL20	65,89	3,19	-
CFSi	63,65	3,45	-
CG	67,26	3,47	-
CGL3	-	-	-
CGL20	69,52	3,48	-
CGSi	73,17	3,92	-

Observações: CF - Fio 10/2 Bruto; CFL3 - Fio 10/2 Lavado por 3 hs com Água

Sanitária; CFL20 - Fio 10/2 Lavado por 20 min. com Água Sanitária; CFSi - Fio 10/2 Tratado com Agente Silano; CG - Fio 10/4 Bruto; CGL3 - Fio 10/4 Lavado por 3 hs com Água Sanitária; CGL20 - Fio 10/4 Lavado por 20 min. com Água Sanitária; CGSi - Fio 10/4 Tratado com Agente Silano;

PAL [61] estudou o desempenho do emprego da fibra de juta como reforçante na produção de compósitos de baixo custo, empregando as resinas poliéster, epóxi e fenólica. Concluiu que esta fibra pode substituir a fibra de vidro em aplicações onde a resistência à intempérie não seja expressiva. Sugeriu, entretanto, a necessidade de um estudo para melhorar a adesão entre a fibra e a resina. Compósitos híbridos podem ser introduzidos para aplicações mais exigentes.

SHAH e LAKKAD [2] estudaram as propriedades mecânicas das resinas poliéster e epóxi reforçadas unidirecionalmente por fibras de juta e vidro e sua combinação, como um compósito híbrido. Os resultados mostraram que o laminado reforçado por fibra de juta tem propriedades melhores do que as da resina pura, mas inferiores aos dos compósitos reforçados com fibra de vidro. Os autores concluíram que a fibra de juta pode ser usada como reforço em combinação com fibra de vidro, como híbrido, em aplicações onde a resistência e o módulo não sejam muito exigidos.

O uso das fibras naturais como reforço para matrizes termoplásticas foi também analisado por MOHANTY e MISRA [17]. Os autores sugerem o uso das fibras em matrizes termoplásticas para a produção de compósitos de baixo custo, pois os termoplásticos são mais baratos do que as resinas termofixas. Em todo caso, as maiores preocupação quanto ao desempenho destes compósitos

estão relacionadas as condições de processamento, intempéries, interface fibra - matriz e dispersão da fibra na matriz, pois estes fatores afetam as propriedades finais do compósito.

GHOSH e GANGULY [62] estudaram o efeito da enxertia da poliacrilonitrila (PAN) em fibra de juta (pré - lavada) e branqueada, usando um iniciador redox. Analisaram a cristalinidade por raio-x, resistência tênsil, comportamento térmico, índice de brancura, tingibilidade, degradação por luz e resistência à umidade. Os resultados mostraram que a enxertia ocorre entre as superfícies e nas regiões intercelulares, como nos lúmens das fibras da juta multicelulares. 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 aplicação industrial.

IDRISS et al [63] investigaram as propriedades físicas e mecânicas da fibra de juta modificada por um filme de acrilato de uretano curado por ultravioleta. A formulação foi desenvolvida com acrilato de uretano combinado com diferentes monômeros, fotoiniciador e plastificantes com seis diferentes formulações. Estas formulações foram então aplicadas sobre o tecido e curados por ultravioleta. Concluíram que embora a plastificação fosse reduzida, a resistência à tração aumenta substancialmente, em torno de 80%, e a alongação à ruptura em cerca de 300%, com uma redução em torno de 60% de absorção d'água.

VARMA et al [64] investigaram o efeito de modificações da fibra de

juta nas propriedades do compósito reforçado com fibra de juta em matrizes poliéster insaturado e éster vinila, com os seguintes agentes: isopropil triisostearoil titanato (TTS), γ - trimetoxi amino silano (AS), cloreto sebacoila (SC) e tolileno di-isocianato (TDI). As reações químicas podem ser observadas na figura 11.

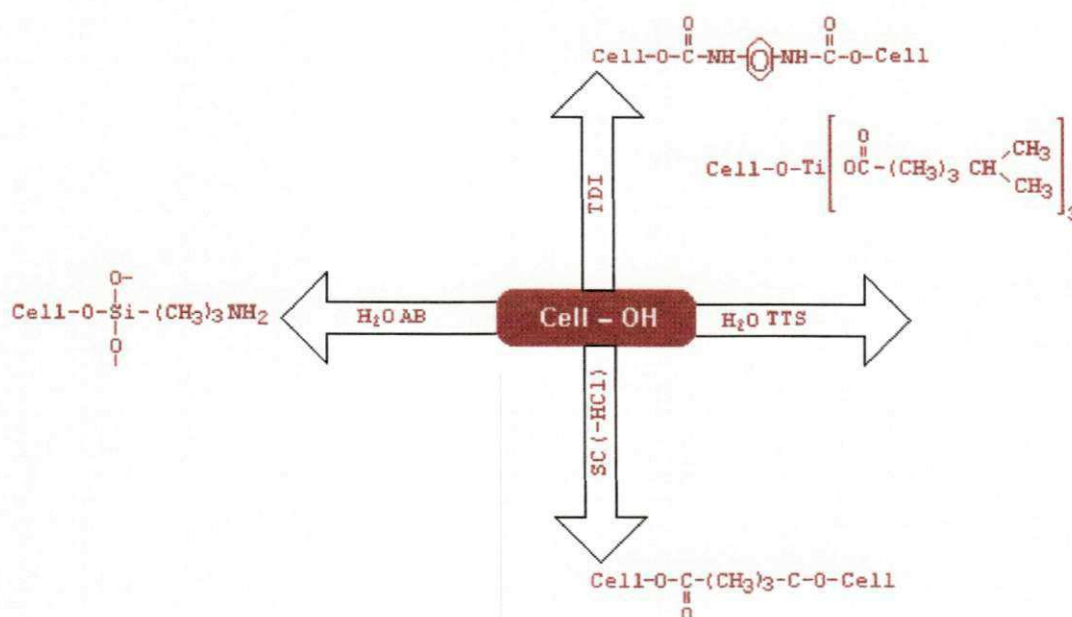


Figura 11 - Modificadores químicos da fibra (cell - OH) por vários tratamentos químicos.

VARMA et al [65], em outra etapa, investigaram as propriedades mecânicas de compósitos Poliéster - Juta - Vidro sujeito ou não a um pré tratamento das fibras com titanato. Concluíram que o compósito híbrido exibe melhores propriedades mecânicas e que o tratamento com titanato produz uma melhora total nas propriedades dos compósitos.

GHOSH e GANGULY [66] realizaram modificações superficiais na fibra de juta com fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído por diferentes concentrações com a finalidade de elevar a característica reforçante da fibra de juta no compósito. Os 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 aparentemente obtido no tratamento da juta com resorcinol-formaldeído. Os autores observaram uma melhora da resistência às intempéries da juta modificada com a presença de camadas de resina fenólica hidrofóbica. Estes resultados são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Efeito da enxertia na propriedade do compósito reforçado por fibra de juta.

Reforço da fibra de Juta Usando	Propriedades Mecânicas dos Compósitos				Propriedades Mecânicas com Exposição em:			
					Água		Umidade	
	σ_t (MPa)	G (GPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)	σ_t (MPa)	G (GPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)
1 Sem Tratamento	89,00	9,00	59,20	6,48	60,00	4,24	67,20	5,00
2. 10% enxertia c/ PAN	98,50	9,86	62,80	7,20	78,00	6,96	82,60	7,25
3. 15% enxertia c/ PAN	110,00	11,80	66,10	7,85	***	***	92,70	8,65
4. 25% enxertia c/ PAN	109,00	11,20	67,50	7,91	***	***	91,30	8,50
5. 10% enxertia c/ PMMA	99,00	9,98	60,98	6,98	76,40	6,90	81,30	7,45
6. 15% enxertia c/ PMMA	99,00	10,06	61,50	6,98	***	***	83,70	7,68
7. 25% enxertia c/ PMMA	95,00	9,70	59,90	6,71	***	***	79,80	7,47

CARVALHO [67] e BATISTA [19] investigaram o efeito de diferentes tipos de tratamentos superficiais e pré-tratamento da fibra de juta nas propriedades mecânicas do compósito poliéster reforçados com tecido da juta. Os tecidos foram tratados com anidrido maléico (2%), pré-polímero isocianato, polioli e uretano (5 - 35%) e poliacetato e 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 maléico, isocianato, polioli e uretano. Os resultados, tabela 9, mostram que tratamento das fibras de juta à 10% de isocianato e uretano promovem um aumento nas propriedades mecânicas do compósito quando comparado ao compósito com fibras brutas.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos compósitos Poliéster - Juta com e sem tratamentos superficiais da juta à 10% em relação ao peso da fibra.

Tratamento	Teor de Fibra (%)	σ_R (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)
Resina Pura	-	$46,76 \pm 1,2$	$8,97 \pm 0,4$	$0,62 \pm 0,01$
Bruta	8,48	$27,48 \pm 1,4$	$5,35 \pm 0,5$	$0,57 \pm 0,03$
	16,46	$29,68 \pm 3,0$	$4,37 \pm 0,3$	$0,68 \pm 0,03$
Isocianato 10%	8,70	$39,10 \pm 2,2$	$4,70 \pm 0,3$	$0,84 \pm 0,04$
	17,32	$41,05 \pm 3,9$	$4,40 \pm 0,4$	$0,96 \pm 0,02$
Uretano 10%	8,50	$34,50 \pm 2,8$	$4,10 \pm 0,3$	$0,84 \pm 0,05$
	17,84	$36,40 \pm 3,7$	$3,90 \pm 0,4$	$0,95 \pm 0,06$
PVAc 10%	8,90	$31,84 \pm 2,3$	$5,49 \pm 0,3$	$0,62 \pm 0,03$
	-	$29,88 \pm 3,0$	$4,98 \pm 0,4$	$0,62 \pm 0,07$

Os autores observaram que a resistência à tração do compósito reforçado com tecido de juta foi menor do que a da matriz de resina poliéster, tabela 9.

A tenacidade à fratura de compósitos poliméricos reforçados por fibras, tem despertado um grande interesse em pesquisadores de todo o mundo. Nesta análise é fundamental observar-se a natureza e a estrutura da fibra, bem como a interação que ocorre na interface fibra-matriz. Como desejado é o aumento da tenacidade do material com o aumento da resistência, estudos mais aprofundados nesta área são necessários. Abaixo descreveremos alguns trabalhos realizados por pesquisadores, onde o mecanismo de fratura foi estudado.

CHOI, YAMAGUCHI e TAKAHASKI [68] estudaram o comportamento à fratura do compósito poliamida-6 reforçado unidirecionalmente com fibra de carbono, usando corpo de prova do tipo flexão em três pontos. Os corpos de prova foram entalhados em duas direções diferentes para a análise da anisotropia do compósito. Os autores observaram que os valores da resistência à flexão e o módulo de flexão obtidos na direção paralela às fibras, foram as menores, enquanto que os perpendiculares às fibras foram consideravelmente maiores. A resistência e a energia absorvida na fratura, para os corpos de prova entalhados na direção paralela às fibras, exibiram elevada sensibilidade ao entalhe. A propagação da trinca foi facilitada por falhas na região interfacial. Os corpos de prova entalhados na direção perpendicular às fibras apresentaram menor sensibilidade ao entalhe. Os corpos de prova entalhados na direção paralela às fibras apresentaram os menores valores de K_C e G_C , mostrada na

tabela 10.

Tabela 10 - Influência da direção do entalhe no fator de intensidade de tensão crítico K_C e na taxa de relaxação de energia de deformação crítica G_C do compósito com fibras unidirecionais CF / PAC ($a/W=0,5$, $B=3mm$).

Direção do Entalhe	K_C (MPa.m ^{1/2})	G_C (KJ / m ²)
L (Paralelo)	3,36 ± 0,12	2,28 ± 0,07
T (Perpendicular)	23,81 ± 4,25	44,67 ± 6,65

PIGGOTT [69] observou que as curvas tensão versus deformação, (as evidências, aparentemente, tendem a mostrar que estas curvas são retas) de compósitos de matriz polimérica com fibras curtas alinhadas (fibras de carbono e/ou vidro), sugerem que um processo de fratura frágil deve ser considerado para a estimativa da resistência destes compósitos. A análise apresentada por PIGGOTT [69], através do balanço de forças e não da aproximação pela mecânica da fratura, produz um resultado em princípio difere fortemente do inicialmente proposto pelo mecanismo da teoria dúctil. O conceito de fração volumétrica mínima, para o reforçamento, pode ser invalidado para matrizes poliméricas frágeis reforçadas por fibras curtas de carbono, enquanto que para as reforçadas com fibras curtas de vidro, pode necessitar de profundas modificações.

CARLING e WILLIAM [70] estudaram o efeito da geometria da fibra no comportamento à fratura do compósito nylon reforçado por fibra de vidro curta produzido por dois processos de fabricação, com extrusão com fibras curtas e pultrusão com fibras longas. Foram fabricados compósitos com 30% em peso da fibra de vidro e os corpos de prova foram entalhados em duas direções (transversal e paralela), com relação à orientação da fibra. A tenacidade à fratura foi avaliada através do fator de intensidade de tensão crítico (K_C) e da taxa de relaxação da energia crítica (G_C). Os corpos de prova foram ensaiados a seco e com a variação do teor de umidade.

Na tabela 11 pode-se observar os valores de tenacidade encontrados. Os autores observaram que a tenacidade tende a aumentar com a umidade do corpo de prova.

Tabela 11 - Tenacidade do compósito nylon-fibra de vidro.

Material	Seco K_C (MPa.m ^{1/2})	Úmido K_C (MPa.m ^{1/2})
EF30L	2,10	2,45
EF30T	3,11	3,72
PF30L	2,16	3,36
PF30T	3,16	4,10
Obs.: EF - Compósito fabricado por processo de extrusão; PF - Compósito fabricado por processo de pultrusão.		

Concluíram que a tenacidade do compósito nylon reforçado com fibra de vidro melhora quando é umedecido e que há uma redução de resistência interfacial entre a fibra e a matriz.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - MATERIAIS

4.1.1 - Introdução

Nos compósitos estudados, cordões de fibra de juta foram utilizados como reforço e uma resina poliéster como matriz. Os agentes modificadores de superfície utilizados foram um pré-polímero isocianato, um uretano e um polioliol, todos derivados do óleo de mamona. A seguir os materiais usados bem como suas características e principais propriedades serão apresentados.

4.1.2 - Resina Poliéster

Utilizou-se como matriz, uma resina de poliéster insaturado ortoftálico pré-acelerado, totalmente polimerizável, de baixa reatividade e baixa viscosidade, fornecida pela RESANA [71] sob o código RESAPOL 10-225, cujas propriedades podem ser vistas na tabela 12.

As principais características da resina poliéster usada são:

- cura rápida à temperatura ambiente (mediante sistema catalítico);
- excepcional penetração nas fibras de vidros;
- laminado de cor clara, o que permite a visualização de bolhas durante o processo de laminação;

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

Tabela 12 - Propriedades da resina poliéster.

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÃO
Aparência visual	Levemente Castanho
Viscosidade Brookfield, à 298 K (30 rpm, sp ²)	300 - 400
Peso Especifico a 293 K, Kg/m ³	1,10 x 10 ³
Índice de Acidez, mgKOH/g	30 máximo
Índice de Tixotropia	1,20
Tempo de Gel, - Curva Exotérmica ⁽¹⁾	1320 – 1560 segundos
Temperatura Máxima - Curva Exotérmica	403 – 429 K
Tempo Mínimo de Cura - Curva Exotérmica	2400 - 3000 segundos
(1) 0,1 Kg de Resina a 298 K. com 1% de peróxido de MEK(Metil Etil Cetona)	

Durante o processo de cura da resina poliéster foi utilizado como catalisador o peróxido de 2-butanona na proporção de 1% em relação a resina.

4.1.3 - Reforço

A fibra de Juta empregada como reforço do compósito, na forma de cordões, foi fornecida pela indústria Têxtil **CASTANHAL**. Os cordões de juta usados são classificados como cordões do tipo 10/2 (de diâmetro menor) e cordões do tipo 10/4 (de diâmetro maior). O diâmetro médio dos cordões de juta variou entre 0,6 a 1,1 mm para a fibra de diâmetro menor e de 1,3 a 1,8 mm para a de diâmetro maior.

4.1.4 - Estireno

Empregou-se o monômero de estireno, fornecido pela EDN, cuja estrutura é mostrada na figura 12:

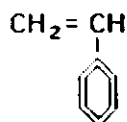


Figura 12 - Estrutura química do monômero de estireno.

O monômero de estireno, além de participar da reação de reticulação, atua como solvente da resina poliéster e dos agentes de acoplamento, e foi empregado numa proporção de 20% em peso de estireno em relação à matriz. Esta quantidade reduz a viscosidade da resina, facilitando sua aplicação e a molhabilidade da fibra. A facilidade na aplicação, garante também a redução das bolhas durante o processo de fabricação do compósito.

4.1.5 - 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 fontes renováveis e pouca danosas ao meio ambiente.

O óleo de mamona, também chamado de óleo de rícino, triglicéride 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 uretanas.

Estruturalmente, o ácido 12 hidroxioleico possui um grupo carboxila e um grupo hidroxila localizado no carbono 12, próximo da ligação olefínica (insaturada) entre o carbono 9 e 10. Essas funções orgânicas podem ser exploradas intensivamente proporcionando possibilidades de se confeccionar macromoléculas (polióis ou pré-polímeros) com diferentes funcionalidades e peso molecular, 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 uretanas de qualidade superior e de elevada resistência ao ataque por hidrólise. Uma das maiores características ligada ao ácido ricinoleico é a viabilidade da síntese de polióis de maior funcionalidade em reações de esterificação e, também, de polióis com funcionalidade baixa, por redução do conteúdo de hidrólise, PROQUINOR [72].

4.1.5.1 - Pré-Polímero Isocianato

O grupo funcional isocianato é extremamente reativo, podendo reagir com: a água gerando amina e dióxido de carbono; com compostos hidroxilados gerando uretano; com amina levando à formação de uréia substituída ou com ácidos formando amidas. O pré-polímero com grupos funcionais isocianatos foi fornecido pela **PROQUINOR** com as seguintes características, tabela 13.

Tabela 13 - Características do pré-polímero isocianato.

Viscosidade (2S)	3000 CPS
%NCO Livre	15%

4.1.5.2 - Polioli

O polioli, de nome comercial **GARICIN**, tem como base o óleo de rícino e possui três grupos hidroxilas que reagem com o di ou poli-isocianatos para formar ligações cruzadas nos sistemas de poliuretano. Os polióis derivados de óleo de rícino, com várias funcionalidades, são indicados para o uso em reações de uretano.

Estes polióis diferem quimicamente dos polióis poliésteres. Eles possuem menos grupos ésteres e não têm ligações éter, encontrados nos poliésteres, e são mais estáveis à hidrólise do que os outros polióis. O polioli utilizado neste trabalho é a base de óleo de mamona fornecido pela **PROQUINOR**

e apresenta as seguintes características , tabela 14.

Tabela 14 - Características do poliol fornecida pela PROQUINOR.

Índice de Hidroxila	230 – 235
Insaturação	75 – 85
Acidez	1,0 - 1,5
Umidade	0,05%
Viscosidade (2S)	75 CPS

4.1.5.3 - Uretano

Os poliuretanos resultam da reação de um di-isocianato com um composto rico em hidroxilas. Os di-isocianatos usados na preparação dos poliuretanos são geralmente do tipo aromático, sendo o mais comum deles os isômeros 2,4 e 2,6-diisocianato de tolieno (TDI). O 4,4-diisocianato de difenilmetano (MDI) também é usado em menor escala. O uretano utilizado neste estudo foi obtido pela reação de 1:1,1 dos pré-polímeros isocianatos e poliol descritos acima.

4.1.6 - Desmoldante

O Poliéster tem a tendência a aderir às superfícies, mesmo bem lisas, e por isso, o uso de desmoldantes é obrigatório para evitar a sua aderência

ao molde. Num estudo preliminar empregou-se como desmoldante o silicone líquido, poliacetato, cera parquetina e a pasta de camaúba. O melhor desempenho na desmoldagem do compósito foi obtido com a pasta de camaúba. A pasta era composta por 80% de cera de camaúba e 20% de parafina, diluída em 200 ml de querosene.

4.2 - MÉTODOS

4.2.1 - Tratamento Superficial das Fibras.

Os cordões de juta empregadas no processo de fabricação foram submetidos a um tratamento superficial com isocianato, polioli e uretano com o objetivo de melhorar a adesão interfacial entre a fibra e a matriz.

Os agentes de acoplamento foram dissolvidos em um monômero de estireno para facilitar sua aplicação nos cordões. A solução foi preparada em um becker de 50 ml, diluída na proporção de 1:4 em monômero de estireno, na razão de 10% em volume em relação ao peso dos cordões.

A aplicação desta solução aos cordões de juta foi realizada com o auxílio de um pincel, que permitia desta forma uma maior uniformidade no molhamento das fibras.

O uretano foi obtido pela reação 1:1,1 dos pré-polímeros polioli e isocianato, diluído em estireno e aplicado as fibras como descrito acima.

Após a aplicação dos agentes de acoplamento, os cordões foram

colocados em uma estufa à temperatura de 353 K durante 1(uma) hora.

Num estudo preliminar investigou-se o efeito da incorporação das soluções dos modificadores superficiais diretamente ao poliéster e a matriz modificada, depositada sobre as fibras. Nestas amostras determinou-se as propriedades de tração dos compósitos e o fator de intensidade de tensão crítico, K_c .

Foi também observado o efeito do tratamento superficial dos cordões de juta nas propriedades mecânicas de tração. Os cordões de juta foram pesados numa balança, em seguida, a solução foi preparada num becker (10% em volume em relação ao peso dos cordões) e diluído 1:4 de estireno. Os cordões ficaram no becker por 2 (duas) horas, em seguida, foram estendidos à temperatura ambiente por 24 horas, antes dos ensaios de tração.

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas de compósitos com fibras de juta pré-tratadas e matriz modificada foram comparados.

4.2.2 - Método de Fabricação do Compósito Poliéster - Fibra de Juta.

O método de fabricação na moldagem do compósito foi o hand lay-up (moldagem manual). É um método muito utilizado por ser prático e barato, permitindo uma boa versatilidade na confecção de peças de geometria simples.

As fibras de juta, em forma de cordão, usadas no processo de fabricação do compósito foram as designadas cordões do tipo 10/2 (diâmetro

entre 0,6 a 1,1 mm) e cordões de tipo 10/4 (diâmetro entre 1,3 a 1,8 mm), com e sem tratamento superficial.

Inicialmente, foi necessário alinhar e fixar os cordões de forma contínua numa tábua, onde podia-se variar a fração volumétrica do compósito, figura 13, utilizando-se uma ou mais fileiras de pregos. Os cordões foram presos na primeira fileira, para todas as lâminas produzidas.



Figura 13 - Tábua usada para o alinhamento dos cordões.

As placas do compósitos Poliéster - Juta foram obtidas de acordo com os procedimentos a seguir:

- 1º - pesagens dos cordões de juta (balança analítica);
- 2º - tratamento dos cordões de juta com os agentes;
- 3º - placas de vidros lavadas e secas;

- 4º - aplicação da pasta à base de carnaúba na placa de vidro e no molde de borracha para facilitar a desmoldagem;
- 5º - colocação do molde de borracha sobre a placa de vidro;
- 6º - preparação da resina poliéster com estireno e catalisador;
- 7º - depósito de resina sobre os cordões presos ao molde;
- 8º - retirada das bolhas com auxílio de um pincel e/ou rolo e
- 9º - fechamento da parte superior do molde com uma placa de vidro.

Os cordões de juta (após o alinhamento) foram tratados com os agentes uretano, polioli e isocianato e, em seguida, colocados numa estufa por 60 minutos à temperatura de 353 K, este procedimento foi realizado antes de preparar a resina poliéster.

A resina, após preparada, era depositada no molde de borracha, figura 14, em seguida lâmina com pincel e/ou rolo, favorecendo uma maior penetração da resina nas camadas internas dos cordões, como também a expulsão do ar. Após este procedimento, colocava-se uma outra placa de vidro sobre o molde de borracha, que permitia deste modo, após a cura, a configuração final da lâmina. Para conservar esta forma final, um peso de 3 Kg foi mantido sobre a placa de vidro por 24 horas à temperatura ambiente.

Na modificação da matriz, os agentes de acoplamento após preparados foram misturados à resina preparada com características semelhantes aos procedimentos anteriores e, em seguida, depositada no molde para a formação do compósito.



Figura 14 - Molde de borracha colocado sobre a placa de vidro.

Após o processo de cura da resina, as placas de vidros foram desmoldadas da lâmina e do molde de borracha. As condições da lâmina quanto às características gerais foram observadas visualmente, ou seja, presença de defeitos internos e externos e se a espessura estava de acordo com a dimensão nominal prevista.

O teor de fibra de juta no compósito foi determinado da seguinte forma:

1º - pesagem dos cordões de juta (W_J);

2º - pesagem da resina poliéster (W_R) e

3º - pesagem da placa do compósito (com dimensões de 35x20x3 mm) após a cura (W_C).

Com o peso de cada componente que compõe o compósito, o cálculo é feito pela seguinte equação:

$$W_C = W_J + W_R \quad (3)$$

onde, W_J é o peso da fibra de juta no compósito, W_R é o peso da resina poliéster no compósito e, portanto, % de fibra de juta na placa (F_J) é dada pela equação,

$$\%F_J = \frac{W_J}{W_C} \times 100 \quad (4)$$

Na equação (3) não levamos em consideração o teor de vazio presente no compósito.

4.2.3 - Preparação dos Corpos de Prova / Determinação das Propriedades Mecânicas.

4.2.3.1 - Preparação dos Corpos de Prova.

Os corpos de prova para os ensaios de tração, flexão, impacto e tenacidade à fratura foram obtidos de acordo com as normas ASTM D - 638 [73], ASTM D - 790 [74], ASTM E - 256 [75] e ASTM E - 399 [76], respectivamente.

O entalhe dos corpos de prova de tenacidade à fratura foi confeccionado por três lâminas de serra, cada uma usinada com uma configuração diferente para dar a forma final do entalhe, figura 15. A pré-trinca

(1,30 mm) dos corpos de prova foi realizada com auxílio de uma lâmina de barbear.

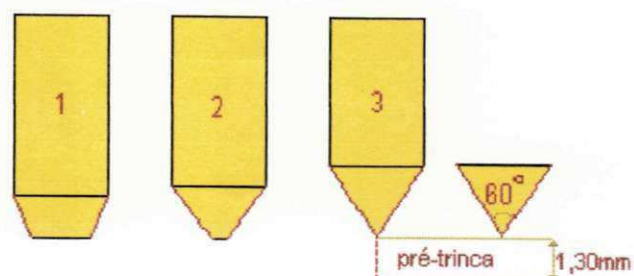


Figura 15 - Configuração das lâminas de serra usada na usinagem do entalhe.

Todos os corpos de prova foram retirados de uma placa do compósito Poliéster - Juta de acordo com a figura 16. Os corpos de prova de tração foram confeccionado com auxílio de corpo de prova metálico padrão.

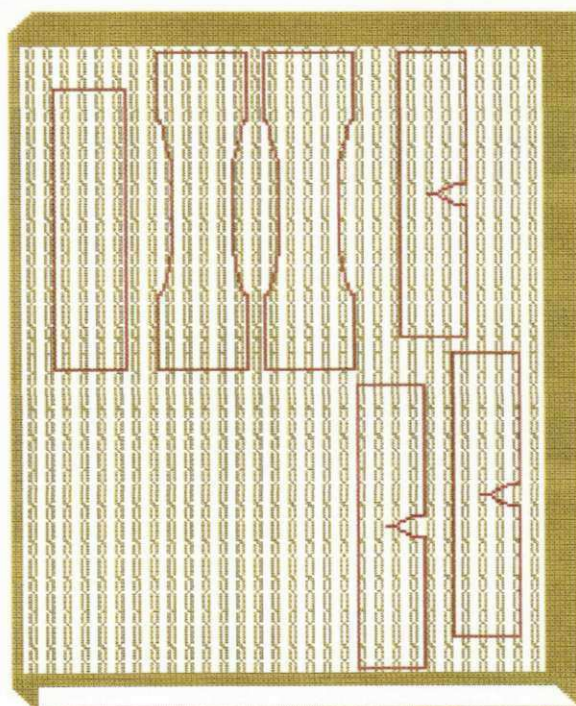


Figura 16 - Posição de retirada dos corpos de prova para os ensaios.

Nas figuras 17 a 19 podemos observar os corpos de prova usados para a determinação das propriedades mecânicas do compósito.

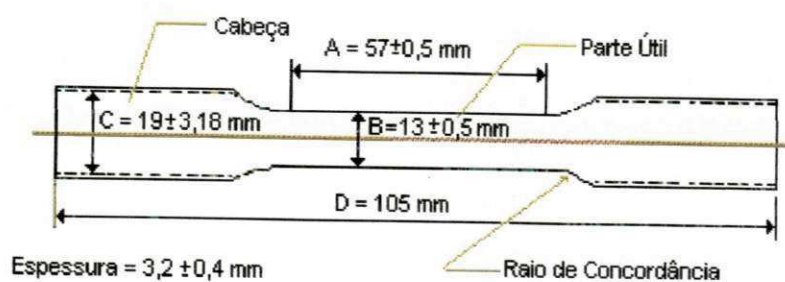


Figura 17 - Corpo de prova para o ensaio de tração.

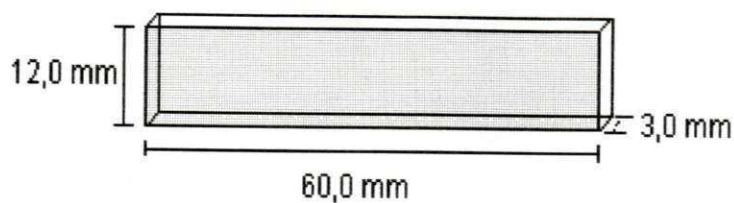


Figura 18 - Corpo de prova para o ensaio de impacto.

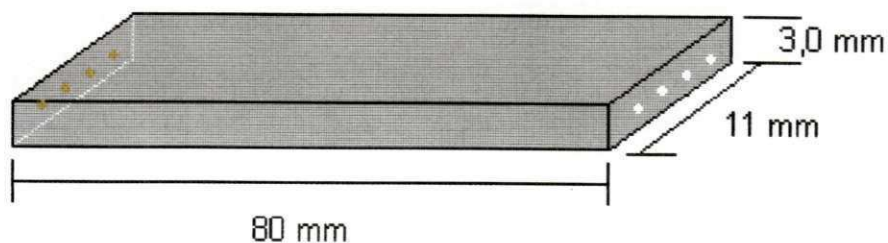


Figura 19 - Corpo de prova para o ensaio de flexão.

4.2.3.2 - Ensaios Mecânicos Convencionais: Tração, Flexão e Impacto.

Os ensaios convencionais de flexão e tração foram realizados numa máquina universal de ensaios, servo hidráulica **MTS 810** e **TESTOMETRIC MICRO 350** acoplada a um micro computador. Os ensaios foram realizados segundo as normas ASTM D - 638 (ensaio de tração) e ASTM D - 790 (ensaio de flexão) à temperatura ambiente.

A velocidade dos ensaios de tração foi de 0,5 mm/min. Foram ensaiados 5 (cinco) corpos de prova para cada condição. As dimensões dos corpos de prova usados nos ensaios de tração podem ser vistas na figura 17. O módulo de elasticidade longitudinal (E) foi determinado a partir da inclinação da curva tensão versus deformação, segundo a equação (5),

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

onde σ é a tensão de tração e ε é a deformação.

Os ensaios de tração nos cordões de juta tinham as mesmas condições apresentadas para os compósitos Poliéster - Juta. Foram ensaiados 10 (dez) corpos de prova para cada condição.

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados com os corpos de prova do tipo flexão em três pontos, sem entalhes.

Os ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios

mecânicos, sob controle de deslocamento , com velocidade de 1,7 mm/min. A distância entre apoios foi de 60 mm, o que implica que a razão L/d foi de aproximadamente 20, figura 20.

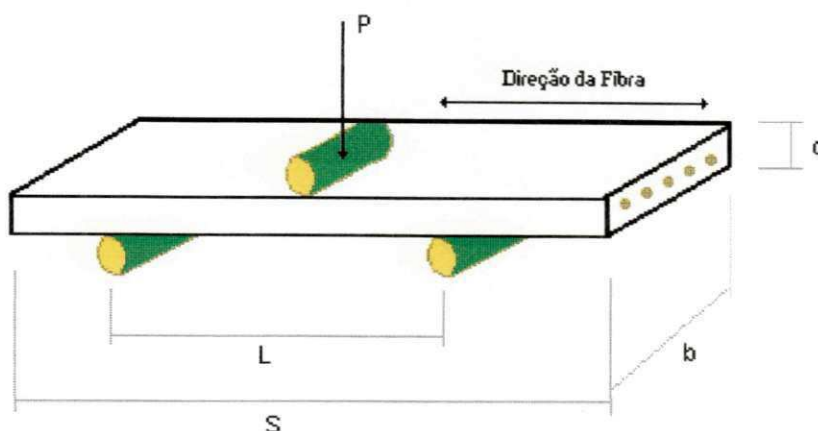


Figura 20 - Esquematização do ensaio de flexão em três pontos sem entalhe.

A resistência à flexão foi determinada pela equação (6),

$$\sigma_F = \frac{3P.L}{2b.d^2} \quad (6)$$

onde P é a carga, L é o espaçamento entre os apoios (suporte span), d é a espessura (altura) e b é a largura do corpo de prova.

O módulo de flexão G, da curva carga versus deflexão, foi determinado a partir da seguinte equação (7),

$$G = \frac{L^3.m}{4b.d^3} \quad (7)$$

onde, m é a inclinação da tangente na porção inicial da curva carga versus deflexão.

Os ensaios de resistência ao impacto IZOD foram realizados em uma máquina de ensaios, segundo a norma ASTM D - 256. Foram ensaiados 5 (cinco) corpos de prova para cada condição sem entalhe, conforme a figura 18. A resistência ao impacto foi calculado pela seguinte equação (8),

$$R_1 = \ell \cdot g / b \quad (8)$$

onde, ℓ é a leitura da máquina [ou seja, é a energia absorvida (Kg.cm)], g é a aceleração da gravidade ($9,807 \text{ m/s}^2$) e b é a largura do corpo de prova.

Em todos os ensaios realizados foram calculados as médias e os respectivos desvios padrão, dados pela equação (9)

$$s = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad (9)$$

4.2.3.3 - Ensaio de Tenacidade

Os ensaios de tenacidade foram realizados à temperatura ambiente.

Corpos de prova do tipo flexão em três pontos foram ensaiados em uma máquina de ensaios servo-hidráulica **MTS 810** e **TESTOMETRIC MICRO 350**, sob controle de deslocamento. A velocidade de deslocamento do ponto de aplicação de carga foi de 0,5 mm/min. A figura 21 mostra o procedimento do ensaio do corpo de prova do tipo flexão em três pontos com entalhe.

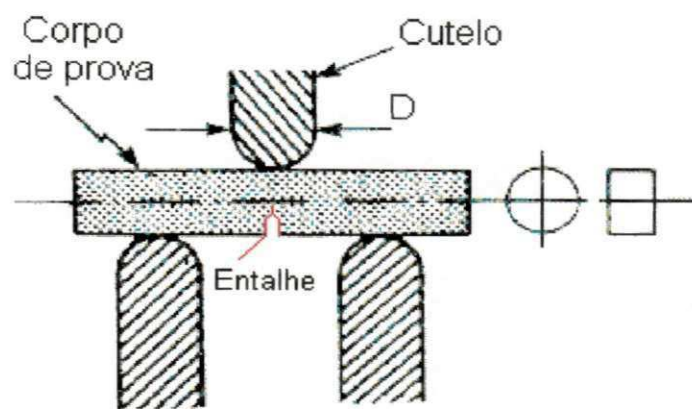


Figura 21 - Esquemática do ensaio de corpo de prova do tipo amostra flexão em três pontos, com entalhe.

Os corpos de prova foram dimensionados de acordo com a norma ASTM E - 399, figura 22. A razão a/W foi em torno de 0,50, ou seja, dentro do intervalo $0,45 < a/W < 0,55$. O tamanho da pré - trinca foi de 1,30 mm. A pré-trinca inicial foi realizada, conforme descrito na seção 4.2.3.1.

Registros de carga versus deslocamento do ponto de aplicação de carga foram realizados durante os ensaios, com o objetivo de se obter o valor de K_Q , segundo a norma ASTM E-399. De acordo com a figura 23, se $P_{max}/P_{5\%} < 1,1$, então, K_Q obtido a partir da equação 11, descrito posteriormente, é o fator de intensidade de tensão crítico do material (Tenacidade à Fratura, K_{Ic} , se

determinado sob deformação plana).

Portanto, com $P_{\max}/P_{5\%} < 1,1$, o valor de P_Q é igual ao valor de $P_{5\%}$, ou seja, $P_Q = P_{5\%}$ (curva do Tipo I). Se, entretanto, existe uma carga máxima, P_{\max} , precedendo a carga $P_{5\%}$, de tal forma que $P_{\max} > P_{5\%}$, então, $P_Q = P_{\max}$ (curvas dos Tipos II e III), figura 23.

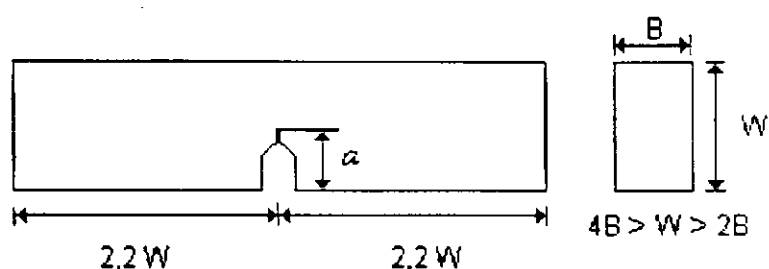


Figura 22 - Configuração do corpo de prova de flexão em três pontos, conforme a norma ASTM E - 399.

Na equação 10, $A = a/W$, onde a é o comprimento de trinca, W é a altura do corpo de prova, B é a espessura e $f(a/W)$ é a função de ajuste para o corpo de prova do tipo flexão em três pontos.

$$f(a/W) = 6A^{1/2} \frac{[1.99 - A(1-A)(2.15 - 3.93A + 2.7A^2)]}{(A + 2A)(1-A)^3} \quad (10)$$

Neste trabalho, os corpos de prova ensaiados apresentaram duas curvas típicas, figura 24 (a) e (b).

Para a determinação de K_Q , as curvas apresentadas na figura 24 foram tratadas de acordo com a recomendação da norma ASTM E-399, figura 23.

O K_Q assim determinado foi denominado de K_{QC} , que uma vez satisfeita as demais condições, é o fator de intensidade de tensão crítico, ou seja, K_C e/ou K_{IC} .

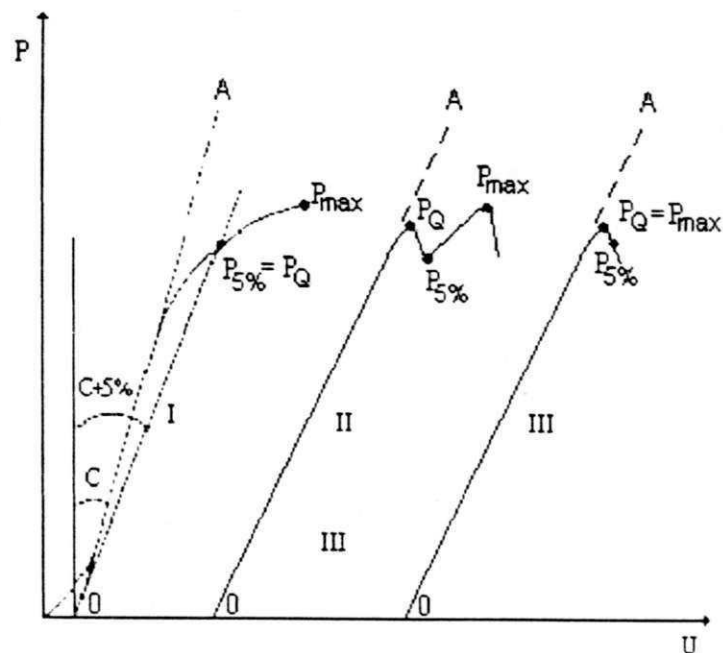


Figura 23 - Curvas características para a determinação de $P_{5\%}$ e P_0 .

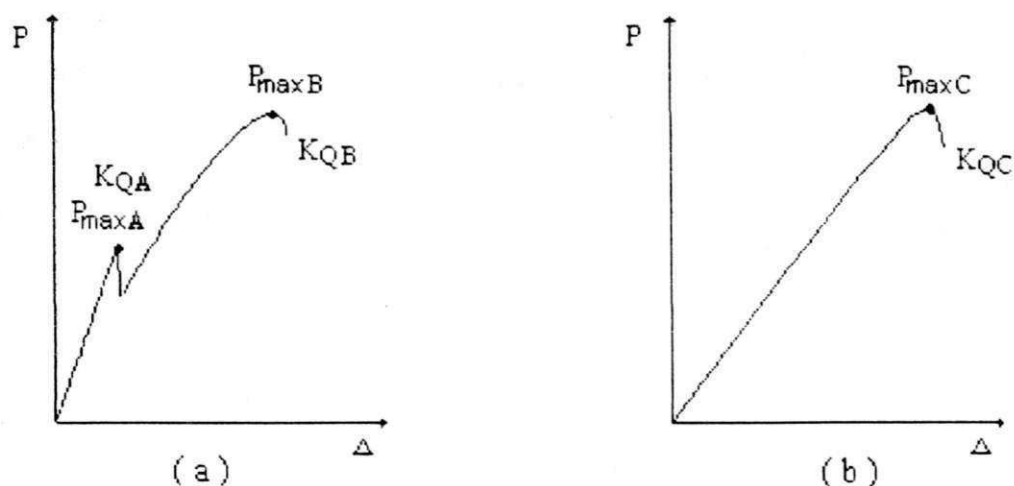


Figura 24 - Registros gráficos de carga versus deslocamento de ponto de aplicação de carga, para os ensaios de tenacidade realizados.

A curva apresentada pela Figura 24 (a) permitiu a determinação de dois valores para K_Q : K_{QA} = fator de intensidade da tensão determinado durante a formação da primeira trinca no compósito; e K_{QB} = fator de intensidade da tensão determinado no momento de fratura do compósito.

Estes dois valores de K_Q (K_{QA} e K_{QB}) deram origem aos fatores de intensidade de tensão crítico aparentes, K_{CA} e K_{CB} , determinados pela seguinte equação (11),

$$K_Q = \frac{f(a/W)P_Q}{BW^{1/2}} \quad (11)$$

onde " a " é o comprimento da trinca, W é a altura do corpo de prova, B é a espessura do corpo de prova e P_Q é a carga da curva (carga x deflexão) que satisfaz as condições da figura 23, WILLIAMS e CAWOOD [77].

A sistemática para a determinação da carga crítica P_Q , na figura 24, pode ser vista no anexo II.

Os fatores de intensidade de tensões críticos, assim determinados, serão analisados e discutidos no capítulo Resultados e Discussão.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - INTRODUÇÃO

A primeira etapa do trabalho consistiu da otimização do processo de moldagem manual ("hand lay - up") de compósitos reforçados por fibras longas. A primeira dificuldade foi conseguir uma distribuição uniforme dos cordões de fibra de juta ao longo da placa. Após várias tentativas, desenvolveu-se uma metodologia adequada para o objetivo proposto. Baseados em estudos desenvolvidos por BATISTA [19] foram selecionados os modificadores superficiais a serem empregados e determinou-se que o percentual ideal de agentes modificadores seria de 10% de solução, em relação ao peso da fibra, e que estes seriam aplicados de duas maneiras: a) sobre as fibras e b) misturados à matriz.

Os compósitos Poliéster - Juta foram reforçados por cordões de juta com dois tipos de calibres. Neste estudo foram observados os efeitos da variação da fração em peso, do tratamento superficial dos cordões e da modificação da matriz poliéster nas propriedades mecânicas convencionais do compósito Poliéster - Juta. A tenacidade do compósito foi também objeto de estudo preliminar.

Os valores médios das propriedades mecânicas, com os respectivos desvios padrão, estão relatados nos resultados a seguir em tabelas e em forma de gráficos para uma melhor compreensão do comportamento apresentado. Os testes para os diversos tipos de corpos de prova foram realizados à temperatura ambiente (entre 301 - 306 K). Os ensaios de resistência à tração e flexão foram

realizados com velocidade de deslocamento de 0,5 e 1,7 mm/min, respectivamente.

Na etapa, a seguir, os resultados serão discutidos com base nas variáveis estudadas e no comportamento apresentado.

5.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORDÕES DE JUTA.

Na tabela 15 e nas figuras 25 a 27 observam-se as propriedades mecânicas de tração, dos cordões de juta, em função de cada tratamento superficial realizado.

Na figura 25 observa-se o efeito do tratamento com uretano (TU), poliol (TP) e isocianato (TI), para os cordões de juta do tipo 10/2 e 10/4. Para os cordões do tipo 10/2 os tratamentos realizados provocaram um pequeno acréscimo na resistência mecânica. Para os cordões do tipo 10/4, os resultados indicam que a resistência mecânica não chega a ser afetada pelos tratamentos realizados. Os dois tipos de cordões foram submetidos ao mesmo tempo de tratamento por 2 horas e ficaram em repouso à temperatura ambiente por 24 horas.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas dos cordões de juta bruta e tratadas.

Tipo do Cordão	Tipo de Tratamento	σ_R (MPa)		ε (%)		E (GPa)	
		$\bar{\sigma}_R$	s	$\bar{\varepsilon}$	s	\bar{E}	s
10/2	B1 ⁽¹⁾	116,07	9,68	1,71	0,22	6,93	0,65
10/2	TU1 ⁽²⁾	125,56	14,20	2,16	0,40	6,47	0,62
10/2	TP1 ⁽²⁾	131,35	14,45	2,23	0,38	7,15	0,85
10/2	TI1 ⁽²⁾	142,09	27,79	2,08	0,23	6,95	0,95
10/4	B2 ⁽¹⁾	102,80	12,22	2,50	0,46	4,09	0,51
10/4	TU2 ⁽²⁾	101,59	12,29	2,54	0,40	4,34	0,73
10/4	TP2 ⁽²⁾	111,58	15,12	3,29	0,65	3,83	0,81
10/4	TI2 ⁽²⁾	97,07	15,10	4,06	0,66	3,01	0,30

(1) - Cordões de juta sem tratamento.

(2) - Cordões de juta tratados superficialmente.

Obs. ver simbologia para identificação dos códigos

Este fato, provavelmente explique o comportamento apresentado pelo cordão do tipo 10/4, que aparentemente exige um maior tempo de exposição na solução para que o tratamento seja mais eficiente.

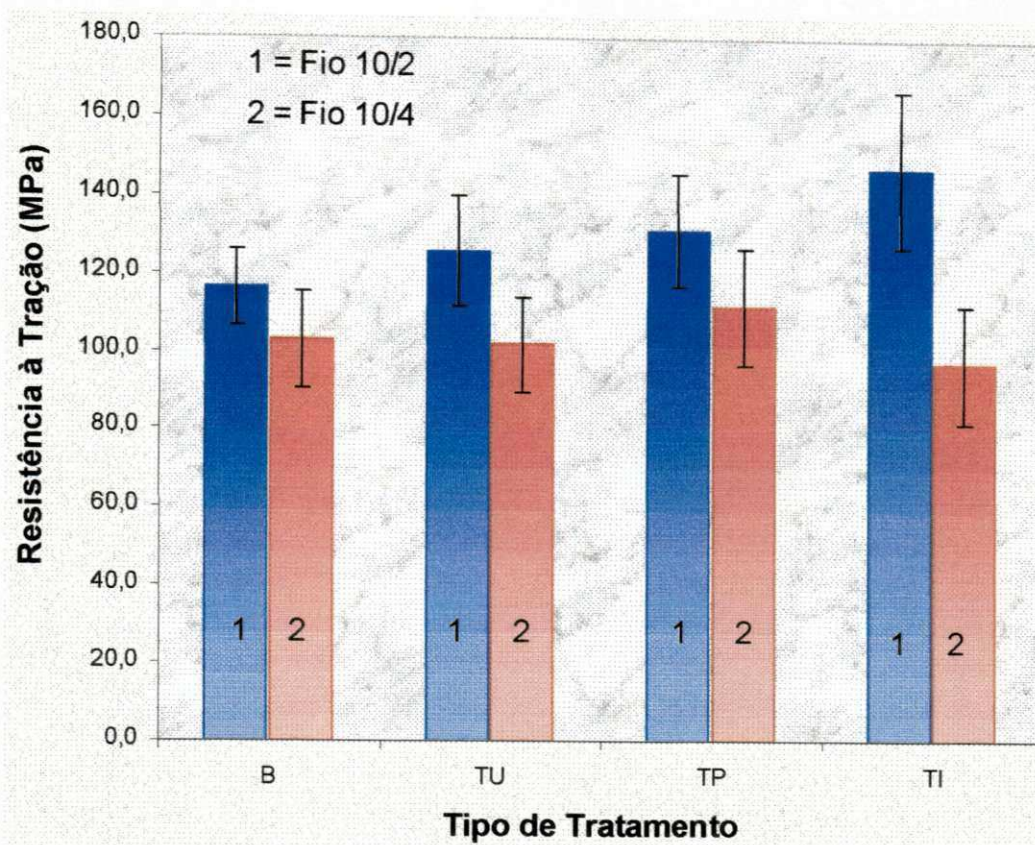


Figura 25 - Influência do tratamento dos cordões de juta na resistência à tração com seus respectivos desvios padrão.

O comportamento dos cordões tratados, quanto à deformação, pode ser visto na figura 26. A deformação foi sempre determinada na carga máxima, embora nem sempre o colapso final do cordão ocorresse no ponto de máxima carga (ver anexo II). Nota-se um pequeno aumento na deformação, para o cordão do tipo 10/2, tratado com uretano, isocianato e poliol. O tratamento com o pré - polímero isocianato, no cordão do tipo 10/4, provocou um acréscimo na deformação de cerca de 50%.

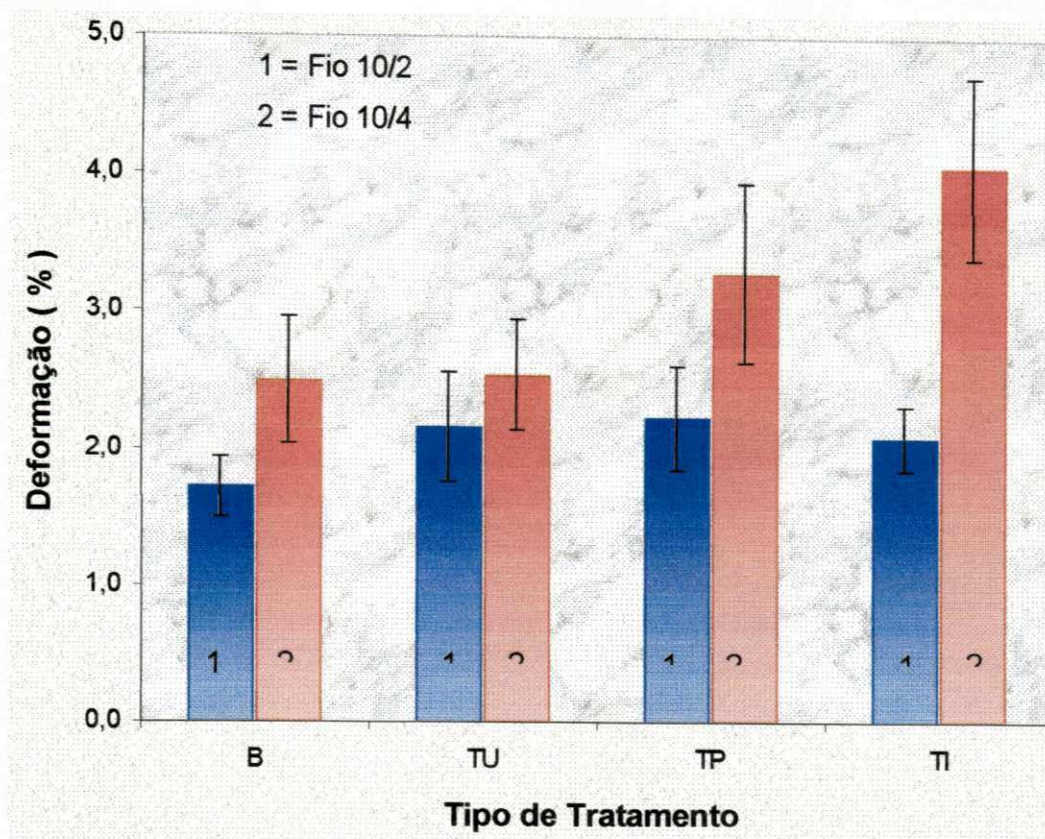


Figura 26 - Influência do tratamento dos cordões de juta na deformação com seus respectivos desvios padrão.

Na figura 27 observa-se o efeito do tratamento no módulo de elasticidade em tração, para os cordões de juta do tipo 10/2 e 10/4. Para o cordão do tipo 10/2 os tratamentos superficiais não tiveram efeito sobre o módulo de elasticidade. O mesmo comportamento foi observado, em geral, para o cordão do tipo 10/4. Entretanto, o tratamento com o pré-polímero isocianato provocou um decréscimo no módulo de elasticidade do cordão do tipo 10/4.

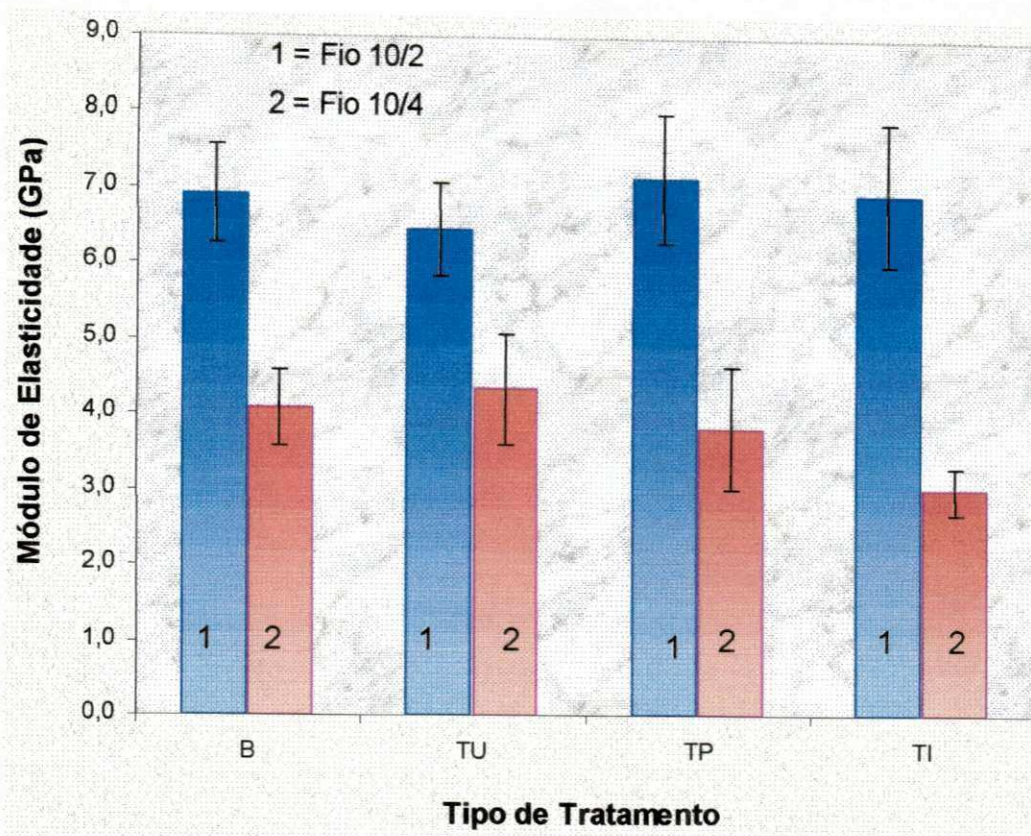


Figura 27 - Influência do tratamento dos cordões de juta no módulo de elasticidade com seus respectivos desvios padrão.

As propriedades mecânicas dos cordões de juta conduzem a resultados inferiores ao da fibra de juta singela. Segundo D'ALMEIDA [9], a resistência à tração da fibra de juta é em média 270,5 MPa, com uma deformação na ruptura de 1,3 % e um módulo de elasticidade de 21,78 GPa. Portanto, a forma do cordão gera uma considerável queda nas propriedades mecânicas, provavelmente causada pelas imperfeições do cordão, não continuidade das fibras, força friccional exercida nas fibras e as curvaturas que formam o cordão.

No ensaio de tração, enquanto o cordão está submetido à tensão as fibras independentes estão em processo de torção em torno do eixo do cordão, o que poderia também explicar as diferenças nas propriedades mecânicas

apresentadas pelos 2 (dois) tipos de cordões utilizados. No anexo II são apresentados as curvas carga versus deformação usadas nos cálculos dos módulos de elasticidades dos cordões de juta.

5.3 - EFEITO DA FRAÇÃO EM PESO DOS CORDÕES DE JUTA NAS PROPRIEDADES TÊNSEIS DE TRAÇÃO DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.

Na tabela 16 e figuras 28 a 30 observa-se o efeito da fração em peso dos cordões de juta bruta nas propriedades mecânicas do compósito Poliéster - Juta. Nas figuras 28 a 30 as retas foram levantadas pelo método da regra da mistura.

Tabela 16 - Propriedades mecânicas do compósito Poliéster - Juta com a variação da fração em peso dos cordões de juta.

Tipo do Cordão	Teor de Fibra (%)	σ_R (MPa)		ϵ (%)		E (GPa)	
		$\bar{\sigma}_R$	s	$\bar{\epsilon}$	s	\bar{E}	s
RP	-	30.01	7.45	3.45	0.86	1.01	0.02
10/2	5.50	40.01	5.69	4.00	0.72	1.19	0.08
10/2	12.50	43.54	3.82	4.06	0.49	1.34	0.17
10/4	13.01	41.48	5.10	4.36	0.55	1.03	0.06
10/4	15.50	45.60	4.12	4.82	0.51	1.06	0.05
10/4	20.82	58.15	4.90	5.88	0.36	0.91	0.09

Como era de se esperar, a resistência mecânica aumenta com o acréscimo do teor em peso dos cordões, figura 28. Este resultado também foi verificado por CARVALHO et al [59] e ARRUDA [60].

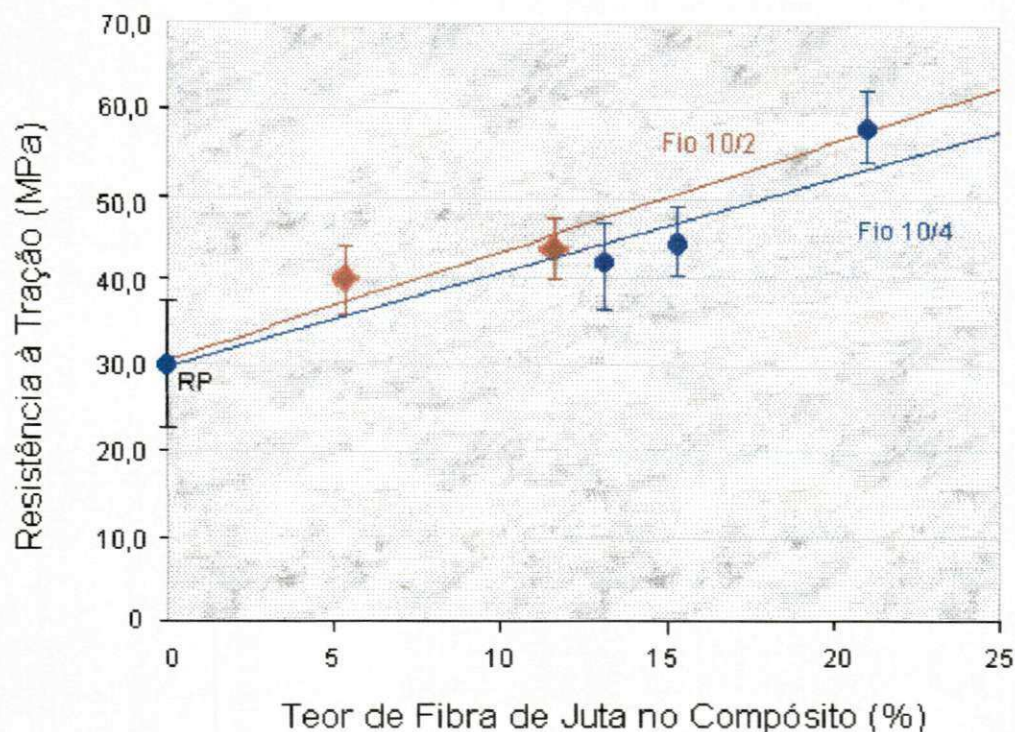


Figura 28 - Resistência à tração do compósito Poliéster - Juta versus a fração em peso dos cordões de juta bruta com seus respectivos desvios padrão.

Na figura 29 observa-se a deformação do compósito Poliéster - Juta versus o teor em peso dos cordões de juta. Este comportamento está relacionado, principalmente com as propriedades de deformação do reforço. A deformação máxima na ruptura dos compósitos reforçados por ambos os tipos de cordão foi bastante semelhante.

Na figura 30 observa-se o comportamento do módulo de elasticidade com o teor em peso do cordão de juta bruta no compósito Poliéster - Juta. Para o

cordão fino (10/2) o efeito foi mais acentuado do que para o cordão grosso (10/4), entretanto, para ambos verificou-se a mesma tendência, o acréscimo do módulo de elasticidade com a fração em peso do cordão de juta. Este tipo de comportamento também foi observado por outros pesquisadores, CHAWLA et al [52], SRIDHAR et al [57], CARVALHO et al [59].

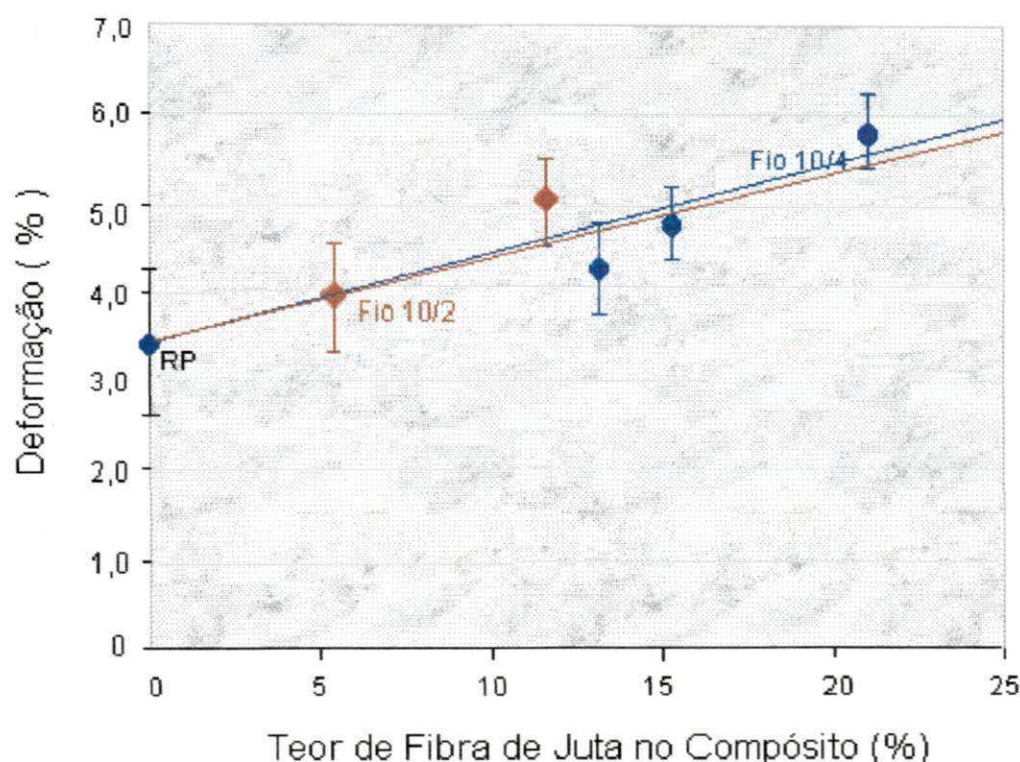


Figura 29 - Deformação do compósito Poliéster - Juta versus fração em peso dos cordões de juta com seus respectivos desvios padrão.

Os resultados indicam que as propriedades mecânicas tendem a aumentar com a introdução dos cordões de fibra de juta no compósito, o que era esperado, visto que as propriedades mecânicas dos cordões de juta são superiores às da matriz poliéster. O módulo de elasticidade dos compósitos

Poliéster - Juta reforçados com cordões de juta do tipo 10/4 apresentam (pela regra da mistura) uma tendência de aumento, embora alguns dos valores encontrados estivessem próximo ao módulo de elasticidade da matriz.

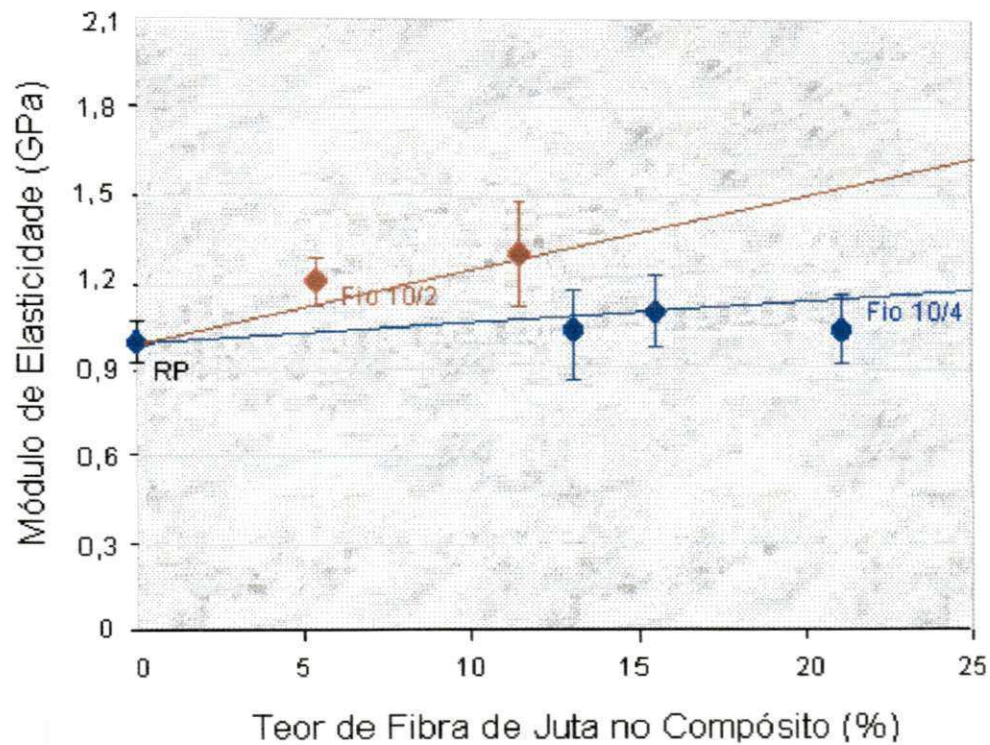


Figura 30 - Módulo de elasticidade do compósito Poliéster - Juta versus fração em peso dos cordões de juta com seus respectivos desvios padrão.

5.4 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DOS CORDÕES DE JUTA E DA MATRIZ POLIÉSTER NAS PROPRIEDADES TÊNSEIS DE TRAÇÃO DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.

A maior dificuldade na compatibilização dos compósitos na região interfacial é combinar as diferentes propriedades de seus componentes individuais, para tanto usam-se produtos com propriedades adesivas capazes de compatibilizar a região interfacial e, aliando as propriedades da matriz e do reforço, reduzir a vulnerabilidade do compósito.

Os tratamentos usados, neste trabalho, foram selecionados para dar continuidade a estudos anteriores desenvolvido por BATISTA [19].

Na tabela 17 e nas figuras 31 a 33 observa-se o efeito do tratamento superficiais com uretano, poliol e pré-polímero isocianato no reforço (tipo 10/2) e do tratamento de modificação na matriz poliéster, nas propriedades tênses de tração do compósito Poliéster - Juta.

O teor em peso dos cordões de juta foi mantido aproximadamente constante. No anexo I é mostrado o cálculo da fração volumétrica deste tipo de reforço no compósito.

Na figura 31 observa-se que houve um aumento de resistência mecânica do compósito Poliéster - Juta (cerca de 33 %), reforçado com o cordão do tipo 10/2 (sem tratamento, B1) em relação à matriz, resultado já esperado, conforme discutido na seção 5.3.

Tabela 17 - Influência do tipo de tratamento nos cordões de juta (10/2) e na matriz poliéster nas propriedades mecânicas do compósito Poliéster - Juta.

Tipo de Cordão	Tipo de Tratamento	Teor de Fibra	σ_R (MPa)		ε (%)		E (GPa)	
			$\bar{\sigma}_R$	s	$\bar{\varepsilon}$	s	\bar{E}	s
-	Matriz	0,00	30,01	7,45	3,45	0,86	1,01	0,02
10/2	B1 ⁽¹⁾	5,50	40,01	5,69	4,00	0,72	1,19	0,08
10/2	TU1 ⁽²⁾	5,89	46,77	7,71	4,62	0,97	1,19	0,12
10/2	TP1 ⁽²⁾	7,91	34,62	4,80	3,97	0,16	1,06	0,05
10/2	TI1 ⁽²⁾	5,23	45,99	3,73	3,55	0,81	1,29	0,06
10/2	MU1 ⁽³⁾	6,17	41,19	2,75	3,32	0,25	1,31	0,03
10/2	MP1 ⁽³⁾	5,31	41,19	5,59	3,46	0,49	1,26	0,04
10/2	MI1 ⁽³⁾	5,73	44,92	5,30	3,57	0,48	1,32	0,03

(1) - Matriz sem tratamento com reforço bruto;
(2) - Matriz sem tratamento com reforço tratado;
(3) - Matriz tratada com reforço bruto.
Obs.: ver simbologia para identificação dos códigos.

Estes resultados podem ser explicados tanto pela formação de uma interface fibra - matriz, quanto, parcialmente pelo efeito dos tratamentos nas propriedades tênséis do reforço, conforme visto na seção 5.2, onde esta é mais expressiva para os tratamentos superficiais dos cordões de juta (10/2) com os agentes que apresentam grupos isocianatos.

Os compósitos com reforços dos cordões de juta tratados superficialmente com uretano e isocianato apresentaram um acréscimo na resistência à tração, o que já era esperado, visto que, os grupos isocianatos presentes nos pré-polímeros isocianato e uretano são capazes de reagir com os grupos OH presentes na celulose que compõe as fibras de juta, BATISTA [19]. Deste modo, estes agentes de acoplamento seriam capazes de reagir quimicamente com a celulose das fibras melhorando a interface fibra - matriz.

Já o poliol, não possui grupos capazes de reagir com a celulose das fibras e, deste modo, sua atuação como agente de acoplamento poderia ser ineficaz. Este parece ter sido o caso, visto que, conforme mostrado na seção 5.2. a resistência do cordão aumentou com o tratamento e, portanto, o esperado, caso houvesse a formação de uma interface forte fibra - matriz, seria um aumento na resistência à tração do compósito, o que não ocorreu.

A resistência à tração do compósito Poliéster - Juta com reforço bruto (não tratado) e matriz poliéster tratada com uretano (MU1), poliol (MP1) e pré-polímero isocianato (MI1), não apresentou variação significativa, dentro do erro experimental. O que é surpreendente já que, segundo BATISTA [19] este método de modificação teria fornecido excelentes resultados, contudo esta referência é feita a compósito Poliéster - Juta com reforço na forma de tecido, o que não tem o mesmo comportamento apresentado para reforço contínuo.

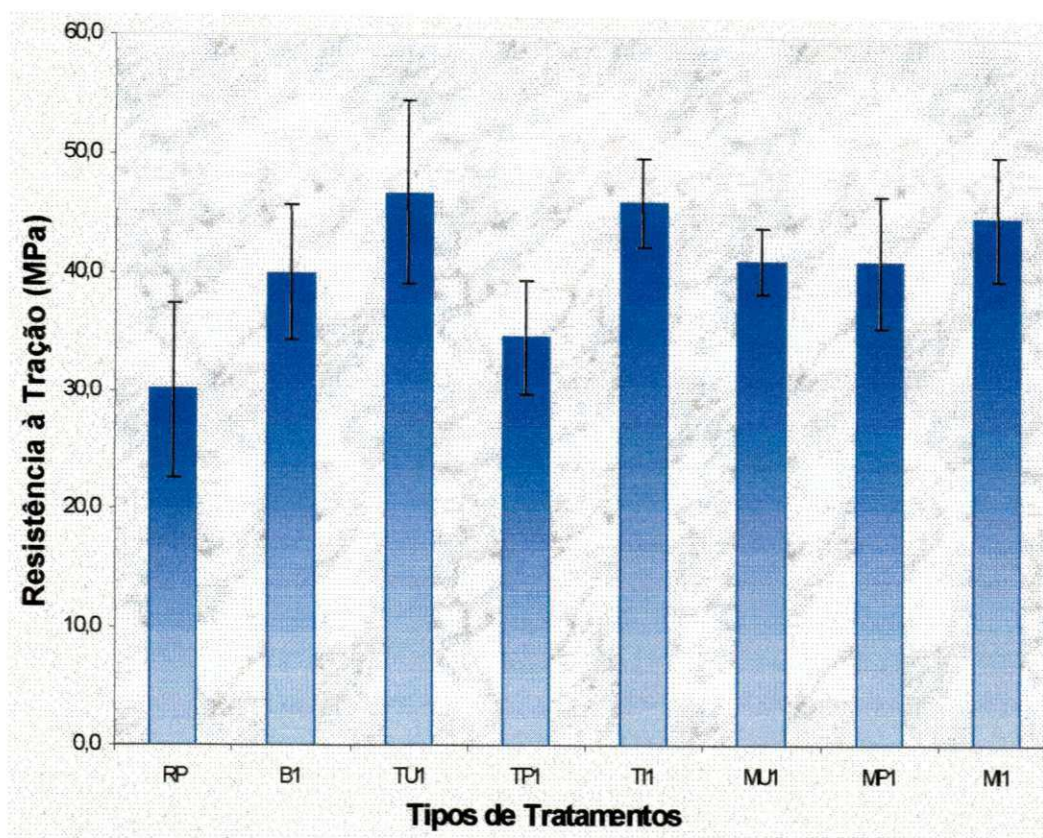


Figura 31 - Resistência à tração do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

Na figura 32 observa-se o comportamento do compósito, em relação à deformação, para a matriz não tratada e com o reforço tratado com uretano (TU1), polioli (TP1) e pré-polímero isocianato (TI1). Observa-se uma pequena variação na deformação, para o compósito com o reforço tratado com uretano (TU1) e isocianato (TI1), quando comparado com o compósito com reforço bruto. Estas variações, porém, são mascaradas pelo erro experimental e não nos permitem determinar com certeza qual a influência dos tratamentos nesta propriedade.

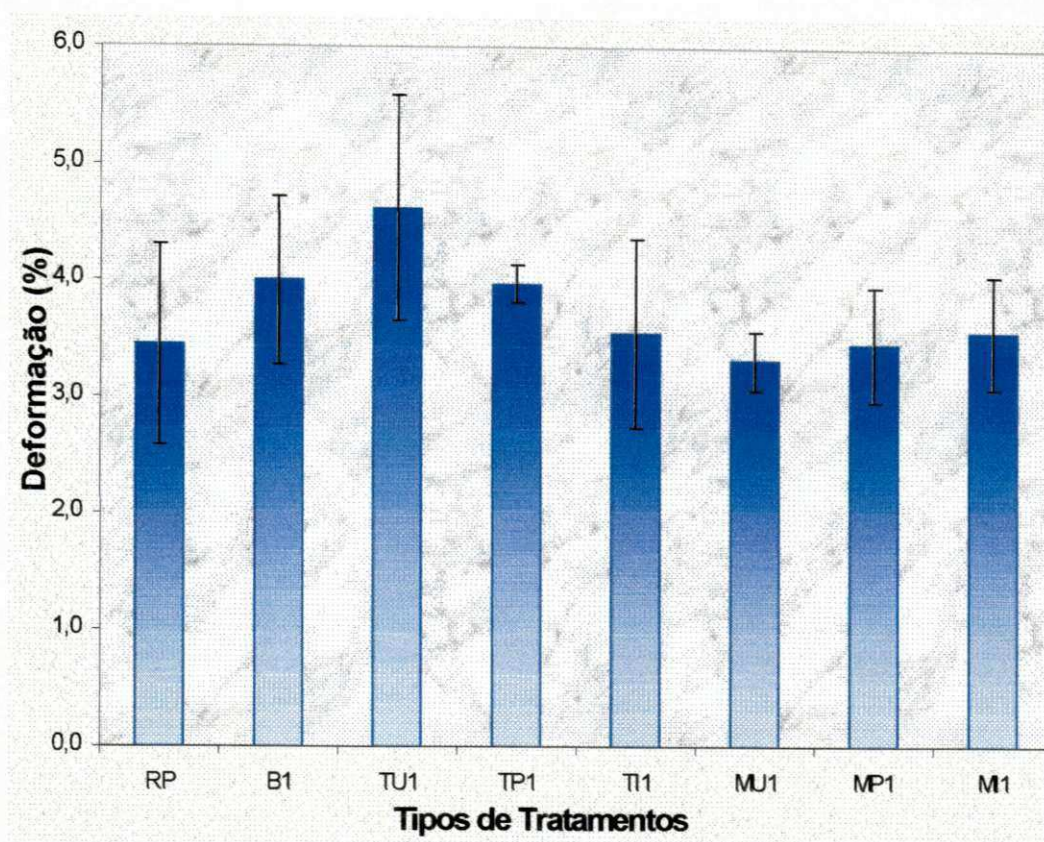


Figura 32 - Deformação do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

O tratamento da matriz do compósito com uretano (MU1), polioli (MP1) e isocianato (MI1), foram equivalentes dentro do erro experimental, porém, provocaram uma pequena queda na deformação do compósito, comportamento comprovado pelo aumento da rigidez do compósito (módulo de elasticidade), figura 33.

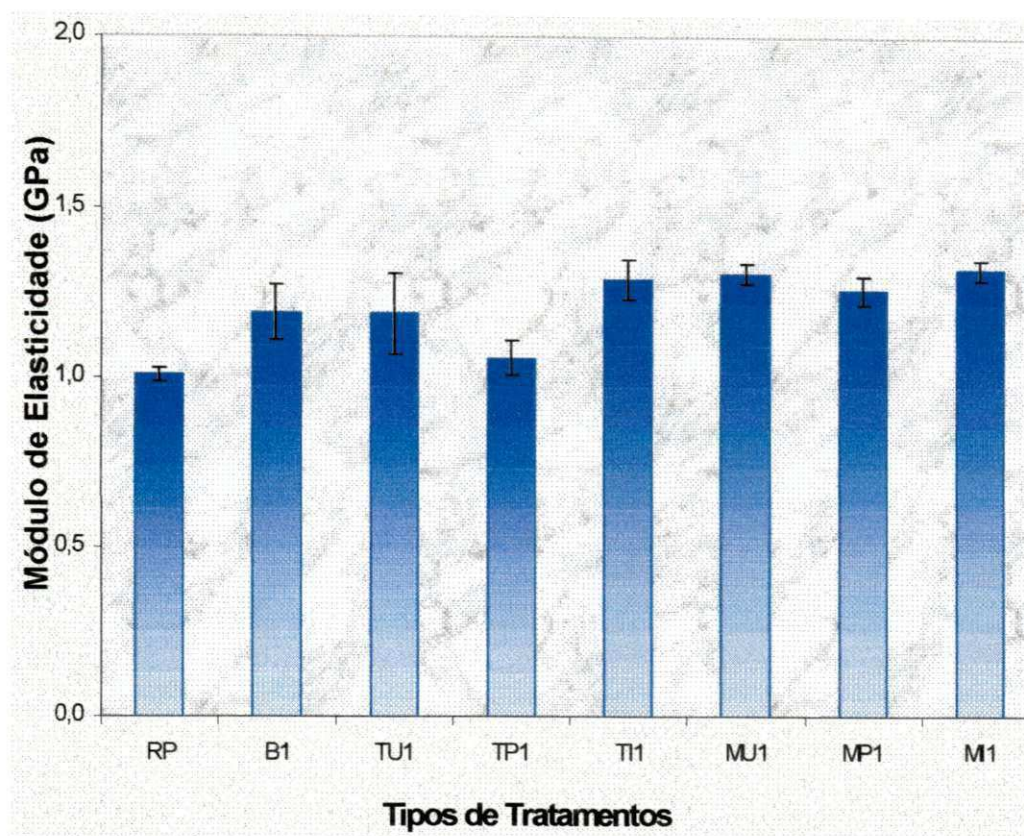


Figura 33 - Módulo de elasticidade do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

Os resultados indicam que houve pouca variação nos módulos de elasticidades dos compósitos Poliéster - Juta em função do tipo de tratamento utilizado e, que o tratamento do reforço com isocianato (TI1) elevou a rigidez do compósito, enquanto o tratamento com polioliol (TP1) provocou uma leve diminuição nesta propriedade. Estes resultados estão de acordo com o esperado em termos de possíveis reações de acoplamento e com as variações observadas para os efeitos dos tratamentos na resistência à tração e na deformação dos compósitos Poliéster - Juta.

No caso da modificação da matriz houve aumento um pouco mais significativo do módulo de elasticidade, no entanto, todos os modificadores atuaram com a mesma eficiência.

Na tabela 18 e nas figuras 34 a 36 observa-se o efeito do tratamento dos cordões de juta (tipo 10/4) e do tratamento da matriz poliéster com uretano, poliál e isocianato, nas propriedades mecânicas de tração do composto Poliéster - Juta.

Tabela 18 - Influência do tipo de tratamento dos cordões (10/4) e da matriz poliéster nas propriedades mecânicas do composto Poliéster - Juta.

Tipo de Cordão	Tipo de Tratamento	Teor de Fibra	σ_T (MPa)		ε (%)		E (GPa)	
			$\bar{\sigma}_T$	s	$\bar{\varepsilon}$	s	\bar{E}	s
-	RP	0.00	30.01	7.45	3.45	0.86	1.01	0.02
10/4	B2 ⁽¹⁾	13.01	41.48	5.10	4.36	0.55	1.03	0.06
10/4	TU2 ⁽²⁾	13.64	46.77	5.10	3.79	0.49	1.45	0.18
10/4	TP2 ⁽²⁾	12.57	51.97	4.16	4.76	0.35	1.12	0.01
10/4	TI2 ⁽²⁾	13.76	52.96	5.75	3.19	0.15	1.22	0.11
10/4	MU2 ⁽³⁾	10.36	43.84	6.57	3.37	0.50	1.33	0.02
10/4	MP2 ⁽³⁾	11.02	38.84	6.47	2.53	0.17	1.50	0.03
10/4	MI2 ⁽³⁾	13.14	46.39	2.35	3.48	0.24	1.35	0.03

Simbologia, ver tabela 17.

O teor em peso dos cordões de juta foi mantido aproximadamente constante. No anexo I é mostrado o cálculo da fração volumétrica para o compósito com reforço de cordões do tipo 10/4, sendo aproximadamente 10%.

Em geral, o comportamento apresentado pelo compósito Poliéster - Juta, reforçado com cordões de juta do tipo 10/4, submetido aos tratamentos com uretano, polioli e isocianato foi semelhante ao apresentado pelo compósito com reforço de cordões de juta do tipo 10/2, embora exista diferença de fração volumétrica entre os dois tipos de reforços.

A figura 34 ilustra o efeito das modificações nos cordões de juta e na matriz poliéster na resistência tênsil dos compósitos. Fica evidenciado que todos os tratamentos no cordão elevaram a resistência dos compósitos sendo, em média, o tratamento com isocianato levemente mais eficiente, o que já era esperado. Estes resultados estão de acordo com os observados para o efeito dos tratamentos na resistência dos cordões, seção 5.2, tabela 13 e figura 25. A única discrepância em relação ao efeito dos tratamentos nos cordões 10/2 deu-se com o tratamento com polioli que, no caso do cordão 10/4 levou a um aumento na resistência e, no cordão 10/2 a uma redução. Uma explicação plausível é que o modificador penetre mais no cordão grosso (10/4), diminuindo possíveis efeitos nocivos de plastificação na interface.

A modificação da matriz poliéster com uretano e isocianato também eleva sensivelmente a resistência à tração dos compósitos Poliéster - Juta, sendo o tratamento mais eficaz com o isocianato. Os resultados, no entanto, foram inferiores aos obtidos para o compósitos equivalentes com cordões modificados. Estes dados, são semelhantes aos obtidos com os cordões finos (10/2), porém

contradizem aos obtidos por BATISTA [19] para compósitos semelhantes reforçados por tecidos de juta. O motivo para esta discrepância não está claro.

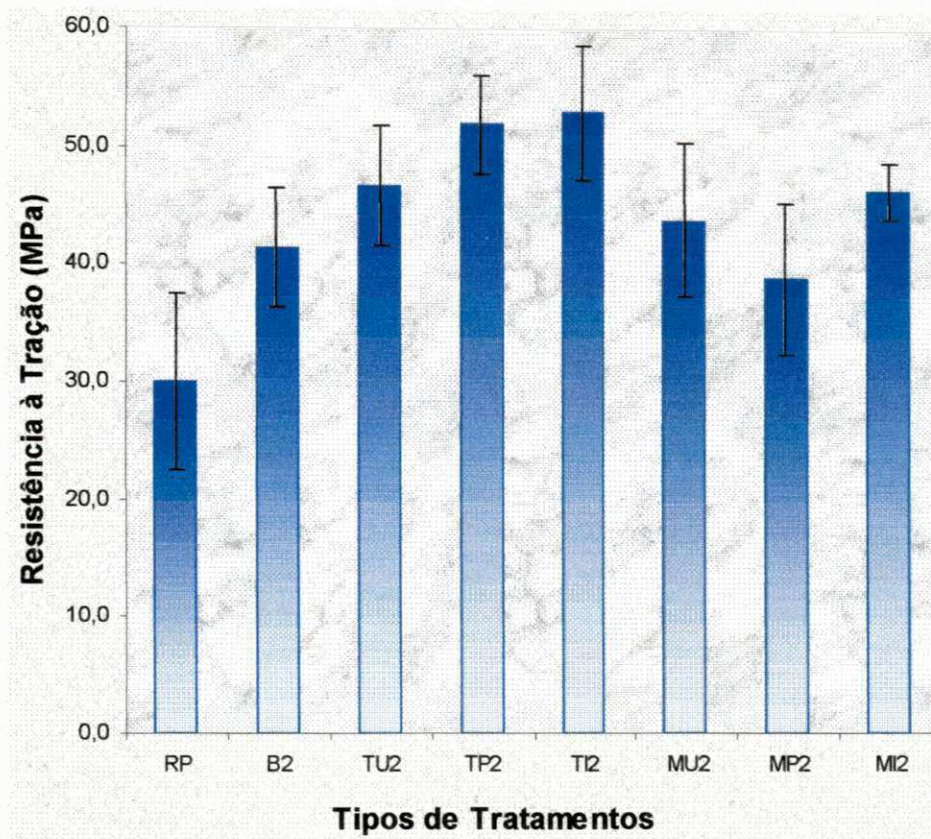


Figura 34 - Resistência à tração do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordão de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

Na figura 35 observa-se o efeito dos tratamentos com uretano (TU2), polioli (TP2) e isocianato (TI2) na deformação do compósito Poliéster - Juta. O tratamento do reforço com uretano e isocianato provocou uma pequena queda na deformação do compósito, enquanto que, o tratamento com polioli levou a um

pequeno aumento nesta propriedade, com relação ao compósito com reforço bruto (10/4). Este comportamento é condizente com o efeito provocado pelo polioli na deformação dos cordões de juta do tipo 10/4 e contrário ao apresentado pelos cordões tratados com isocianato, figura 26 e tabela 15, seção 5.2.

A influência dos diversos tratamentos na deformação dos compósitos reforçados por cordões de juta grossos (10/4) não exibiu a mesma tendência apresentada pelos reforçados com cordões finos (10/2), tabela 17 e figura 32. Os motivos para esta discrepância de comportamento não são claros e talvez possam ser explicados pelas diferenças na impregnação dos cordões e acessibilidade de grupos funcionais para efeitos de acoplamento.

Em relação aos compósitos Poliéster - Juta de matriz modificada, houve redução no alongamento na ruptura com todos os modificadores utilizados, sendo a redução maior com a adição de polioli à matriz. Estes resultados são semelhantes aos reportados para compósitos equivalentes reforçados por cordões de juta finos (10/2).

A figura 36 ilustra o efeito dos diversos tratamentos realizados no módulo de elasticidade dos compósitos Poliéster - Juta reforçados por cordões grossos (10/4). Praticamente, não houve variação no módulo pela inclusão dos cordões de juta brutos. Para os compósitos com reforço tratados com polioli e isocianato, verificou-se um acréscimo em torno de 12% e 20%, respectivamente, no módulo de elasticidade quando comparado com o módulo da matriz. O tratamento com uretano, no entanto, levou a um sensível aumento nesta propriedade, provavelmente provocado por mudanças na interface fibra matriz.

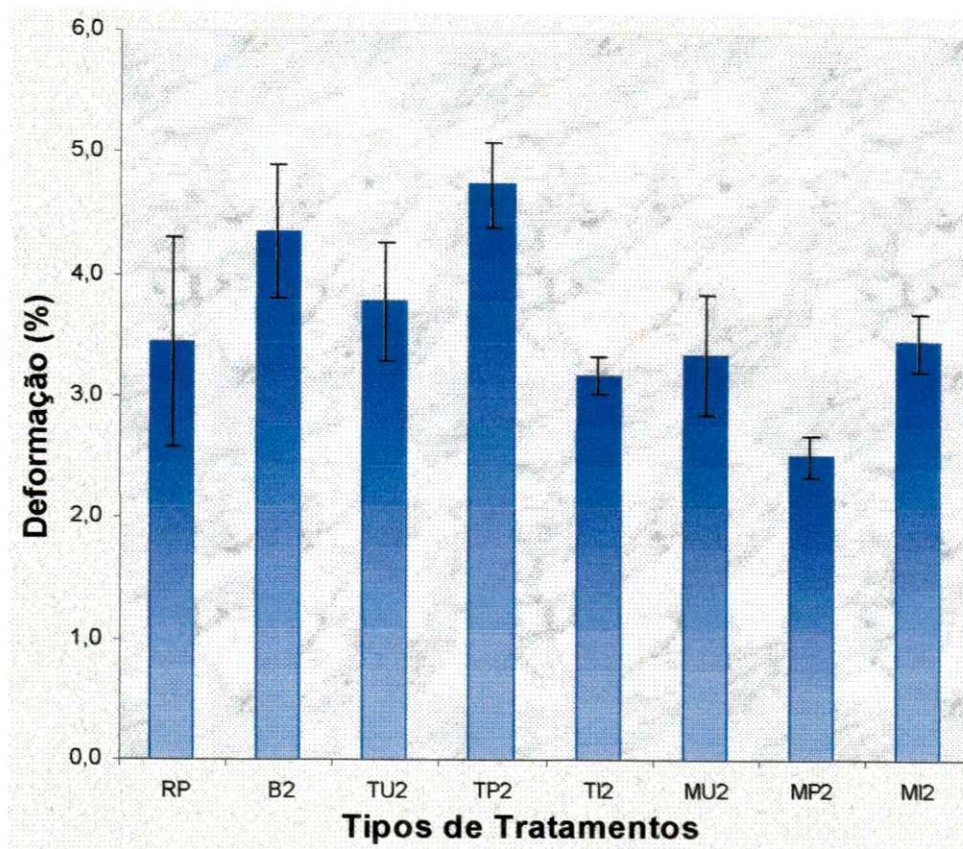


Figura 35 - Deformação na ruptura do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordões de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

A modificação da matriz levou a um aumento no módulo de elasticidade dos compósitos Poliéster - Juta, sendo a modificação com o polioli mais eficiente. Estes dados são coerentes com os apresentados para a variação da resistência e deformação dos compósitos equivalentes. Esperava-se que as modificações com uretano ou isocianato tivessem um efeito enrijecedor maior, visto que estes modificadores podem, em princípio, reagir com os grupos OH do reforço. Os dados obtidos para o módulo de elasticidade dos compósitos Poliéster - Juta reforçados por cordões grossos (10/4) e finos (10/2) são semelhantes,

exceto que, no caso do reforço por cordões 10/4, os compósitos de matriz modificada com poliál apresentaram módulo levemente superior ao obtido por modificações com uretano ou isocianato.

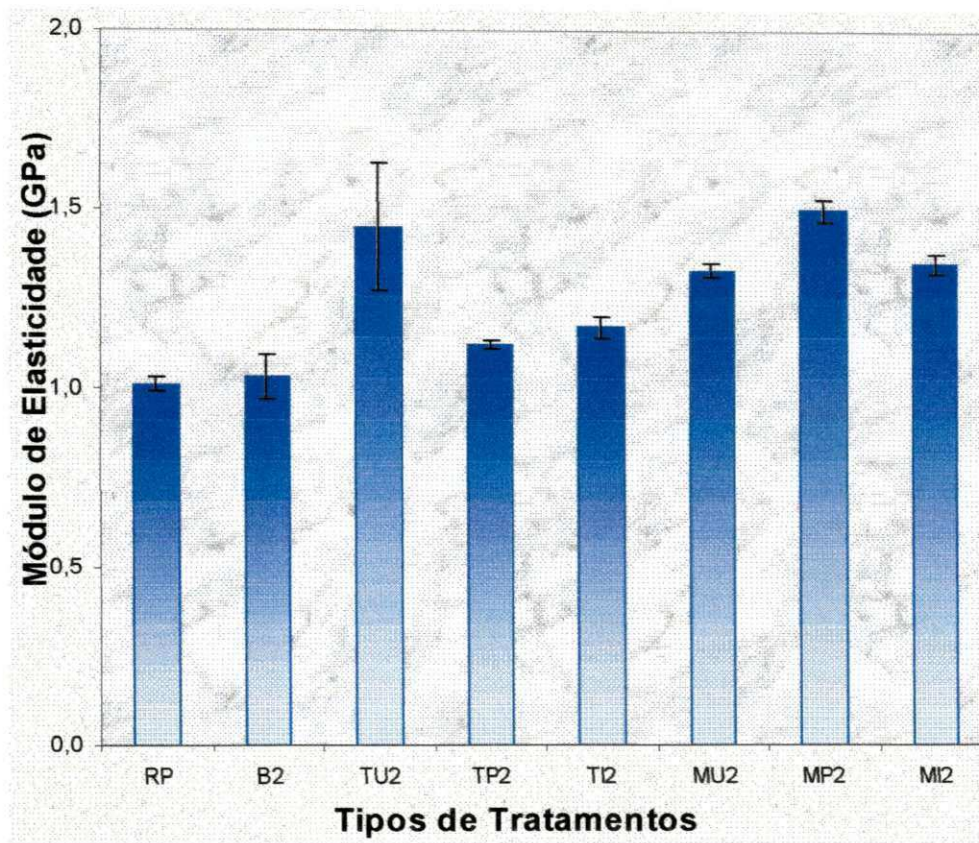


Figura 36 - Módulo de elasticidade do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos. Cordões de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

Conclui-se com estes resultados que as propriedades mecânicas de tração dos compósitos Poliéster - Juta reforçados com cordões de juta do tipo 10/2 aumentaram com o tratamento realizado no cordão com isocianato e

uretano. A modificação da matriz com os três agentes elevaram sensivelmente a resistência à tração. O aumento na rigidez foi mais significativo no compósito reforçados com cordões de juta do tipo 10/2.

Os compósitos reforçados com cordões de juta do tipo 10/4 não apresentaram o mesmo comportamento. Os tratamentos superficiais dos cordões com os agentes poliál e isocianato apresentaram uma performance melhor. A modificação da matriz com o agente isocianato foi a que apresentou o melhor desempenho com relação a resistência à tração.

5.5 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DOS CORDÕES DE JUTA E DA MATRIZ POLIÉSTER NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FLEXÃO DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.

Na tabela 19 e nas figuras 37 a 39 observa-se o efeito do tratamento dos cordões de juta (tipo 10/2) e do tratamento da matriz poliéster, nas propriedades mecânicas em flexão do compósito Poliéster - Juta. O teor em peso dos cordões de juta foi mantido praticamente constante.

Na figura 37 observa-se o comportamento da resistência mecânica à flexão do compósito Poliéster - Juta versus o tipo de tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster.

Tabela 19 - Influência do tipo de tratamento dos cordões de juta (10/2) e da matriz poliéster nas propriedades mecânicas de flexão do compósito Poliéster - Juta.

Tipo do Cordão	Tipo do Tratamento	Teor de Fibra	σ_F (MPa)		Δ (mm)		G (GPa)	
			$\bar{\sigma}_F$	s	$\bar{\Delta}$	s	\bar{G}	s
-	RP	0,00	79,70	8,82	4,94	0,55	3,09	0,19
10/2	B1 ⁽¹⁾	5,50	78,64	12,40	4,55	0,42	3,24	0,32
10/2	TU1 ⁽²⁾	5,89	68,17	17,52	4,02	0,69	3,30	0,72
10/2	TP1 ⁽²⁾	7,91	77,26	4,38	4,75	0,35	3,09	0,06
10/2	TI1 ⁽²⁾	5,23	81,71	8,28	4,57	0,40	3,46	0,40
10/2	MU1 ⁽³⁾	6,17	80,91	11,74	5,89	0,60	2,92	0,15
10/2	MP1 ⁽³⁾	5,31	75,80	10,34	5,18	0,24	3,10	0,09
10/2	MI1 ⁽³⁾	5,73	84,53	7,10	5,66	0,38	2,86	0,08

Simbologia, ver tabela 17.

Os resultados indicam que, dentro do erro experimental, a resistência mecânica à flexão do compósito Poliéster - Juta não foi afetada pelos tratamentos com uma pequena tendência de baixa nos valores dos compósitos com cordões tratados com uretano. Como verificado por CARVALHO et al [59] e ARRUDA [60], a resistência à flexão quando determinada em corpos de prova de dimensões reduzidas varia muito pouco, principalmente, para teores pequenos de reforço.

O tratamento realizado na matriz poliéster, da mesma forma dentro do erro experimental, não afetou a resistência à flexão do compósito Poliéster - Juta.

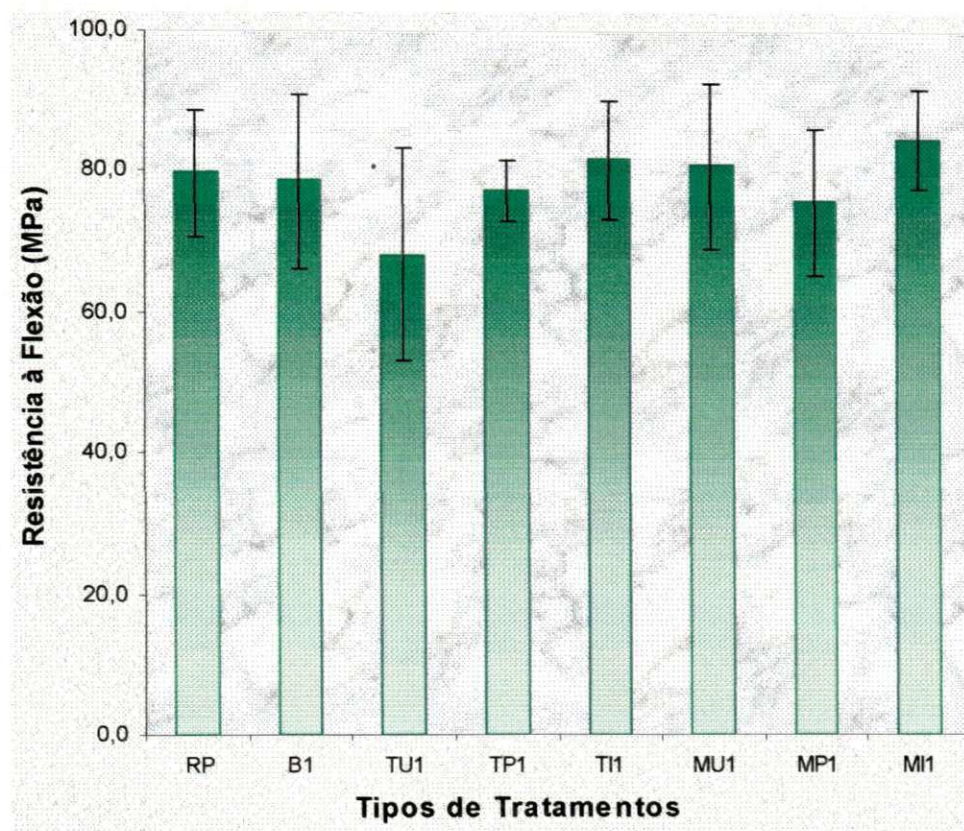


Figura 37 - Resistência à flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

Na figura 38 observa-se o comportamento da deflexão do compósito Poliéster - Juta versus o tipo de tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster. O tratamento superficial dos cordões praticamente não afetou a deflexão dos compósitos. Por outro lado, houve um pequeno acréscimo na

deflexão para o compósito com matriz poliéster tratada com uretano (MU1) e isocianato (MI1).

O efeito do tipo de tratamento realizado no reforço e na matriz, sobre a deflexão do compósito Poliéster - Juta, foi pequeno. CARVALHO et al [59] e BATISTA [19] verificaram o mesmo efeito para compósitos de matriz poliéster - tecido de juta com reforço bruto e pré-tratado.

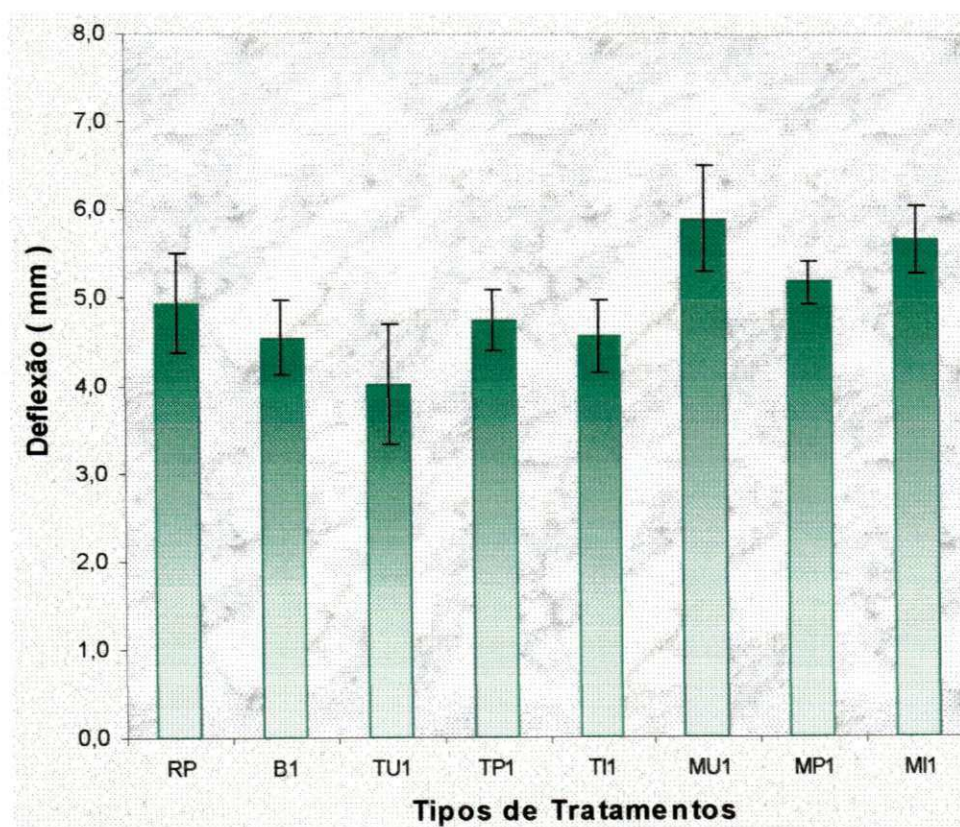


Figura 38 - Deflexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

Na figura 39 observa-se o efeito do tipo de tratamento do reforço e da matriz poliéster no módulo de flexão do compósito Poliéster - Juta.

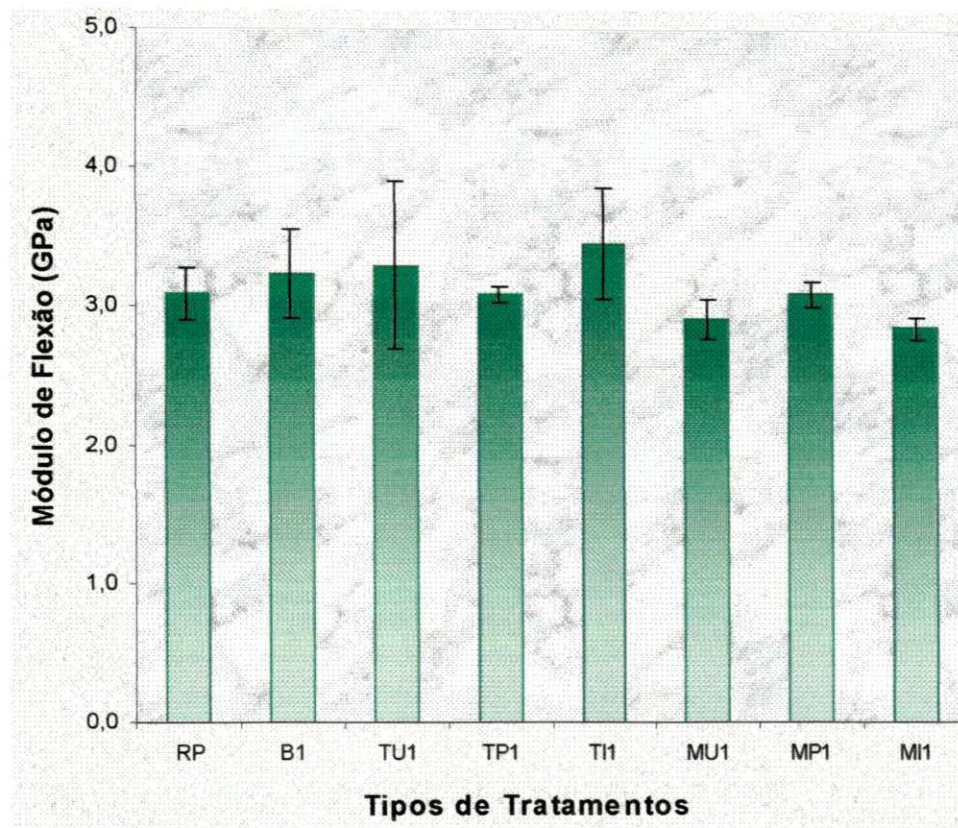


Figura 39 - Módulo de flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

Os resultados indicam, em geral, que o módulo de flexão do compósito Poliéster - Juta varia muito pouco quando comparado com o módulo de flexão da resina pura. O efeito do tratamento da matriz poliéster no compósito Poliéster - Juta, em média, não apresenta grandes variações, porém a dispersão

dos dados é relativamente elevada, o que segundo BATISTA [19] e CARVALHO [59] pode ser atribuído a uma impregnação não homogênea do reforço.

Aparentemente o pequeno teor de reforço, não permitem que se possa obter um efeito significativo nas propriedades de flexão do compósito estudado.

Na tabela 20 e nas figuras 40 a 42 observa-se o efeito do tratamento do reforço e da matriz poliéster nas propriedades mecânicas de flexão do compósitos Poliéster - Juta reforçados por cordões grossos (10/4).

A resistência à flexão destes compósitos apresentou um comportamento semelhante ao do compósito Poliéster - Juta reforçado com cordões de juta do tipo 10/2 tratados com uretano (TU1), poliol (TP1) e isocianato (TI1), figuras 37 e 40, ou seja, dentro do erro experimental houve pouca ou nenhuma variação desta propriedade com o tratamento realizado.

A modificação da matriz poliéster do compósito reforçado com cordões de juta do tipo 10/4 apresentou uma pequena queda na resistência mecânica à flexão dos compósitos sem que houvessem diferenças significativas entre os efeitos dos diversos modificadores. Estes resultados diferem dos obtidos para compósitos equivalentes reforçados por cordões finos (10/2), onde a resistência à flexão permaneceu inalterada com as modificações da matriz.

Tabela 20 - Influência do tipo de tratamento dos cordões de juta (10/4) e da matriz poliéster nas propriedades de flexão do compósito Poliéster - Juta.

Tipo de Cordão	Tipo de Tratamento	Teor de Fibra	σ_F (MPa)		Δ (mm)		G (GPa)	
			$\bar{\sigma}_F$	s	$\bar{\Delta}$	s	\bar{G}	s
-	RP	0,00	79,70	8,82	4,94	0,55	3,09	0,19
10/4	B2 ⁽¹⁾	13,01	80,17	3,05	4,80	0,35	3,48	0,33
10/4	TU2 ⁽²⁾	13,64	74,97	8,46	4,70	0,84	3,38	0,34
10/4	TP2 ⁽²⁾	12,57	83,37	13,37	6,64	0,44	3,95	0,40
10/4	TI2 ⁽²⁾	13,76	74,77	13,49	4,18	0,60	4,00	0,50
10/4	MU2 ⁽³⁾	10,36	70,07	7,31	5,89	0,60	2,92	0,15
10/4	MP2 ⁽³⁾	11,02	62,63	8,17	5,18	0,24	3,10	0,09
10/4	MI2 ⁽³⁾	13,14	70,67	4,56	6,80	0,45	3,21	0,27

Simbologia, ver tabela 17.

Na figura 41 observa-se o comportamento da deflexão do compósito Poliéster - Juta versus o tipo de tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster.

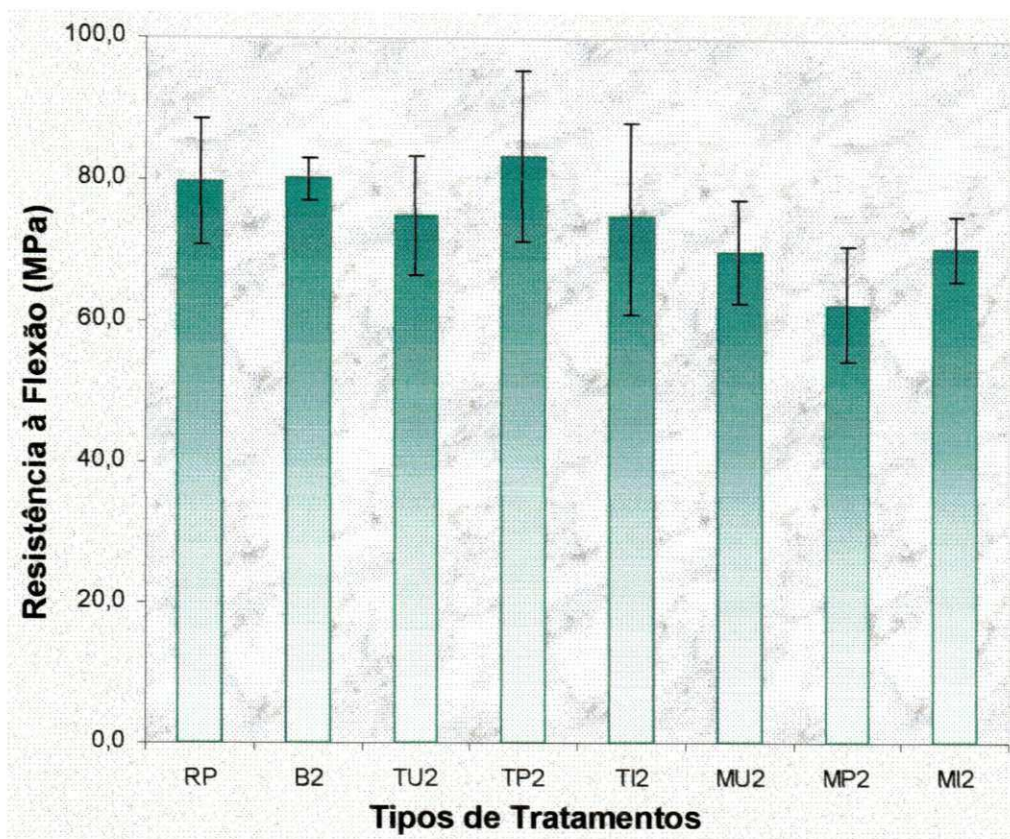


Figura 40 - Resistência à flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

O comportamento apresentado pela deflexão dos compósitos reforçados com cordões de juta grosso (10/4) foi levemente diverso ao verificado para os compósitos reforçados com cordões finos (10/2), figuras 38 e 41. Isto é, naquele caso (10/2) houve pouca ou nenhuma influência dos tratamentos dos cordões na deflexão dos compósitos, enquanto a modificação da matriz levou a um leve aumento na deflexão dos compósitos. Para os compósitos reforçados por cordões grossos (10/4) o tratamento do cordão com isocianato levou a uma leve redução e, com polioli, a um sensível aumento na deflexão do compósito. Em

princípio, estes seriam os comportamentos esperados, visto que o polioliol além de não ser acoplável ao reforço, possui massa molar inferior e higroscopicidade superior ao isocianato.

A modificação da matriz levou a um aumento na deflexão dos compósitos reforçados por cordões grossos (10/4), o que também foi observado para compósitos equivalentes reforçados por cordões finos (10/2).

Na figura 42 observa-se o efeito do tipo de tratamento do reforço (cordão do tipo 10/4) e da matriz poliéster no módulo de flexão do compósito Poliéster - Juta. O comportamento é similar ao verificado para o compósito Poliéster - Juta reforçado com cordão de juta do tipo 10/2, figuras 39 e 42. Os resultados são coerentes com os efeitos dos tratamentos nos cordões com as variações na resistência à flexão e deflexão dos compósitos Poliéster - Juta, exceção feita ao tratado com polioliol que apresentou módulo de flexão elevado, quando o oposto seria o esperado.

O módulo de flexão dos compósitos de matriz modificada foi levemente menor do que o de matriz pura, resultado coerente com o comportamento destes compósitos com a resistência à flexão e deflexão. Estes resultados seguem o mesmo tipo de comportamento apresentado no compósito reforçados por cordões finos (10/2).

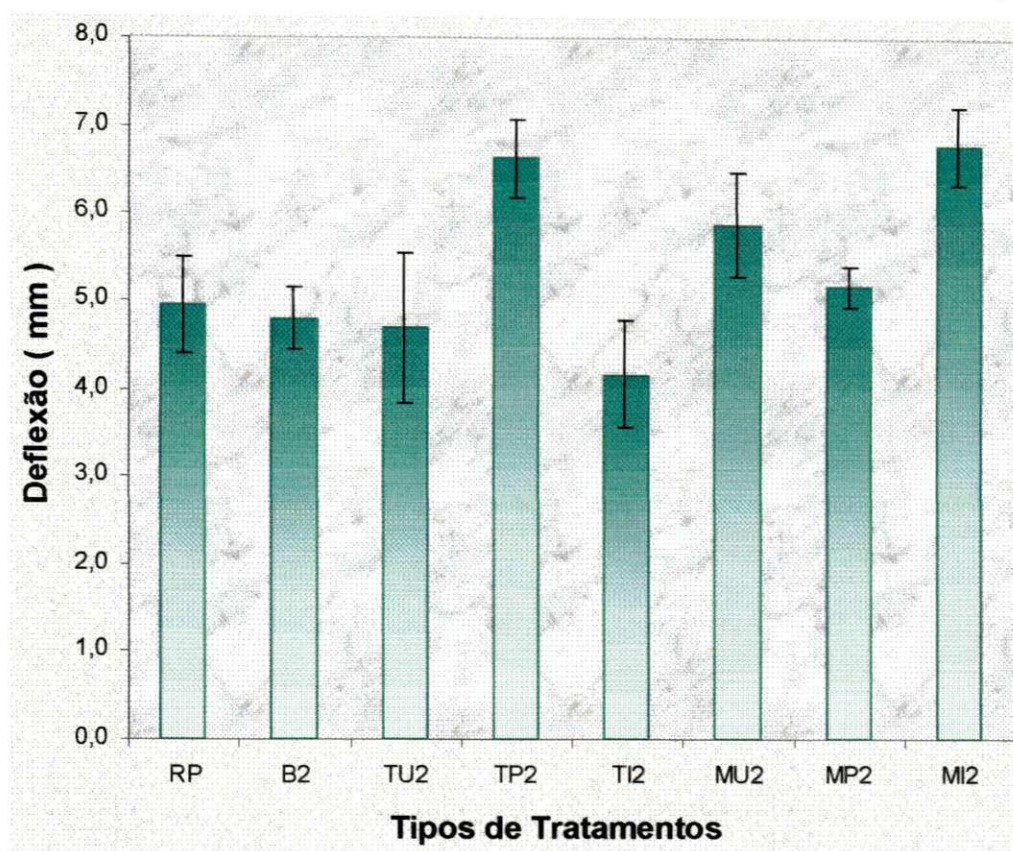


Figura 41 - Deflexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

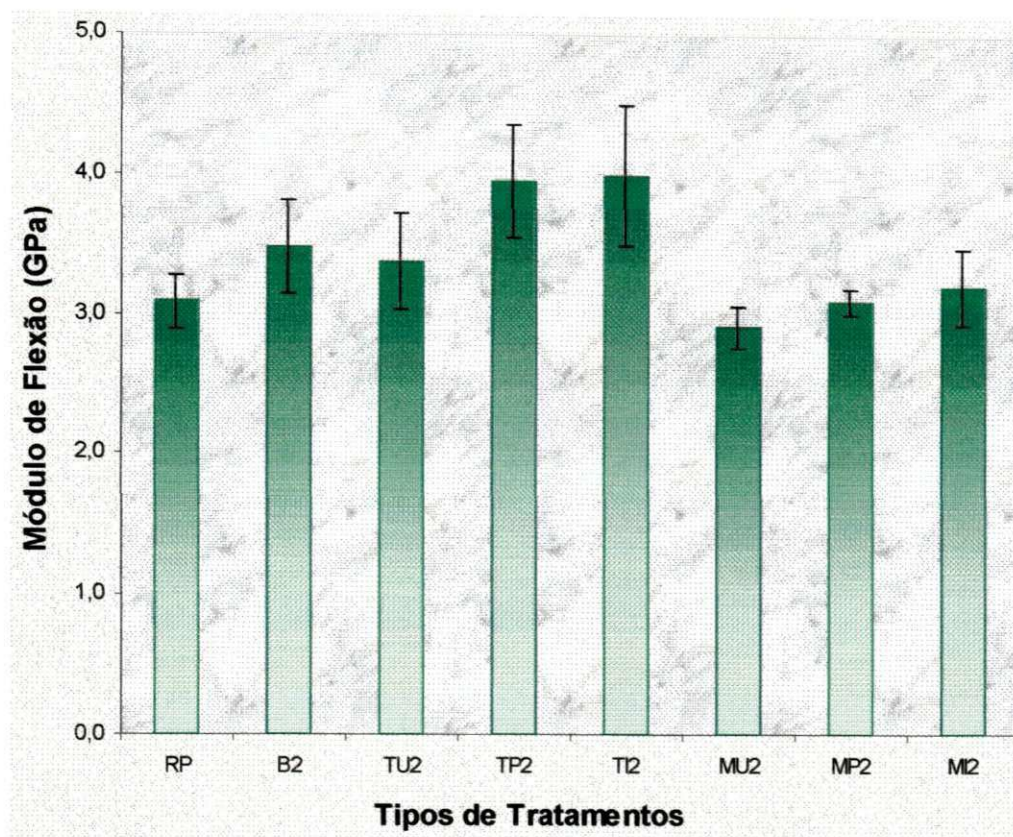


Figura 42 - Módulo de flexão do compósito Poliéster - Juta versus tipos de tratamentos do reforço e da matriz poliéster. Cordões de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

5.6 - INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DOS CORDÕES DE JUTA E DA MATRIZ POLIÉSTER NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.

Nas tabelas 21 e 22 e nas figuras 43 e 44 observam-se os valores da resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta versus o tipo de tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster.

Tabela 21 - Influência do tratamento dos cordões de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta reforçado com cordões do tipo 10/2.

Tipo do Cordão	Tipo de Tratamento	Teor de Fibra	Resistência ao Impacto (J / m)	
			\bar{E} (IZOD)	s
Resina Pura	RP	-	22,34	4,81
10/2	B1 ⁽¹⁾	5,50	18,43	3,61
10/2	TU1 ⁽²⁾	5,89	16,58	4,82
10/2	TP1 ⁽²⁾	7,91	27,30	4,97
10/2	TI1 ⁽²⁾	5,23	29,40	8,39
10/2	MU1 ⁽³⁾	6,17	18,97	3,62
10/2	MP1 ⁽³⁾	5,31	20,21	4,10
10/2	MI1 ⁽³⁾	5,73	21,36	3,65

Simbologia. ver tabela 17.

Os resultados mostram que a resistência ao impacto do compósito Poliéster - Juta reforçado por cordões (10/2) brutos foi inferior, enquanto que o

reforçado por cordões grossos (10/4) foi bastante superior à resistência ao impacto da matriz pura. Isto é atribuído ao fato da fração volumétrica do reforço do cordão 10/2 ser muito baixa (cerca de 4%) e, portanto, sua presença não teria efeito reforçante no compósito. Segundo CLARK e ANSELL [56], SATYANAYANA [53] e PRASAD [51], a resistência ao impacto aumenta com a fração volumétrica do reforço, o que ficou bem claro para o reforço do cordão do tipo 10/4.

Tabela 22 - Influência do tratamento dos cordões de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta reforçado com cordões do tipo 10/4.

Tipo do Cordão	Tipo do Tratamento	Teor de Fibra	Resistência ao Impacto (J / m)	
			\bar{E} (IZOD)	s
Resina Pura	RP	-	22,34	4,81
10/4	B2 ⁽¹⁾	13,01	40,26	5,37
10/4	TU2 ⁽²⁾	13,64	29,05	4,53
10/4	TP2 ⁽²⁾	12,57	35,43	9,29
10/4	TI2 ⁽²⁾	13,76	45,75	1,37
10/4	MU2 ⁽³⁾	10,36	38,79	3,75
10/4	MP2 ⁽³⁾	11,02	38,25	3,87
10/4	MI2 ⁽³⁾	13,14	38,41	4,95

Simbologia, ver tabela 17.

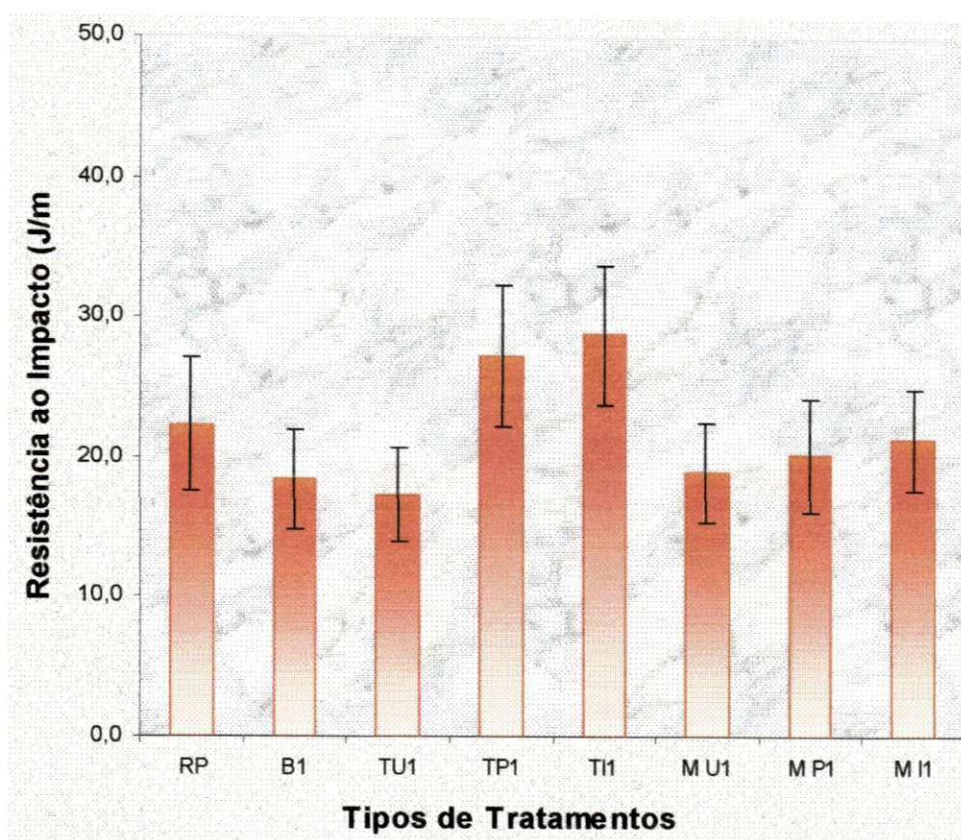


Figura 43 - Influência do tratamento dos cordões de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta. Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

O efeito dos diversos tratamentos nos cordões na resistência ao impacto (IZOD) dos compósitos reforçados por cordões finos (10/2) mostram uma queda na resistência ao impacto para o tratamento com uretano, enquanto que o tratamento com poliál e isocianato levaram a um aumento na resistência ao impacto dos compósitos. Entretanto, a fração volumétrica do reforço tratado com poliál foi um pouco maior. Comportamento semelhante foi observado para os compósitos reforçados com cordões grossos (10/4), exceção para o tratamento com poliál, em que se verifica uma sensível queda da resistência ao impacto. O

melhor desempenho no tocante a resistência ao impacto destes compósitos foi obtido com cordões tratados superficialmente com isocianato.

O efeito da modificação da matriz poliéster foi semelhante para os compósitos reforçados por cordões finos (10/2) e grossos (10/4). Neste caso, houve pouca influência do tratamento e o desempenho dos compósitos foi muito semelhante aos compósitos Poliéster - Juta reforçados por cordões sem tratamento superficial, figuras 43 e 44.

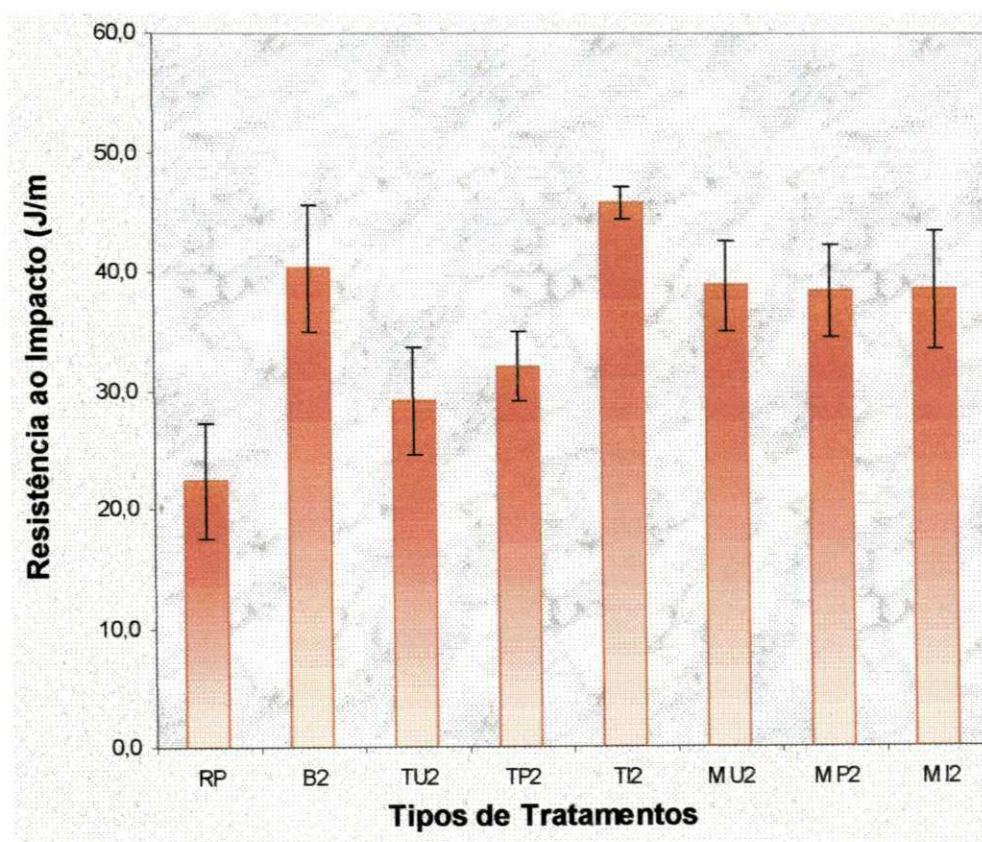


Figura 44 - Influência do tratamento do cordão de juta e da matriz poliéster na resistência ao impacto (IZOD) do compósito Poliéster - Juta. Cordões de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

Convém, neste momento, chamar a atenção para o fato de que os resultados dos ensaios de impacto são de natureza qualitativa e a dispersão apresentada, principalmente para os tratamentos com isocianato (cordão do tipo 10/2) e com polioliol (cordão do tipo 10/4), tornam difícil uma interpretação mais conclusiva.

5.7 - ESTUDO PRELIMINAR DA TENACIDADE DO COMPÓSITO POLIÉSTER - JUTA.

Nas tabelas 23 e 24 e figuras 45 e 46 observa-se os valores de tenacidade (K_C) do compósito Poliéster - Juta versus o tipo de tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster. Ver no capítulo "Materiais e Métodos" e anexo II, o método usado para determinar o valor de K_C .

Nas figuras 45 e 46 e tabelas 23 e 24 observa-se que a tenacidade do compósito aumenta com a fração volumétrica do reforço quando comparada com a tenacidade da matriz poliéster. O aumento foi maior para o compósito com reforço do cordão 10/4 (de maior fração volumétrica).

O efeito do tratamento superficial no cordões 10/2 do compósito Poliéster - Juta foi pequeno, entretanto, com exceção para o tratamento com polioliol, os tratamentos tendem a aumentar a tenacidade do compósito. Este comportamento é mais nítido para o reforço com cordão do tipo 10/4, em que também o tratamento com polioliol aumentou a tenacidade do compósito. Este efeito

provavelmente tem relação com a interface fibra - matriz do compósito, contudo, seriam necessários mais ensaios para sermos conclusivos.

Tabela 23 - Valores de tenacidade (K_C) para o compósito Poliéster - Juta versus o tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster. Reforço com cordão de juta do tipo 10/2.

Tipo do Cordão	Tipo de Tratamento	Teor de Fibra	K_C (MPa.m ^{1/2})	
			\bar{K}_C	s
-	RP	0,00	1,17	0,07
10/2	B1 ⁽¹⁾	5,30	2,55	0,35
10/2	TU1 ⁽²⁾	5,42	2,61	0,49
10/2	TP1 ⁽²⁾	5,23	2,49	-
10/2	TI1 ⁽²⁾	5,23	2,68	-
10/2	MU1 ⁽³⁾	5,47	2,35	-
10/2	MP1 ⁽³⁾	5,91	2,53	0,36
10/2	MI1 ⁽³⁾	5,32	3,04	0,02

Simbologia, ver tabela 17.

Os tratamentos de modificações realizados na matriz poliéster do compósito com reforço do cordão do tipo 10/2 não tiveram um efeito significativo, quando comparado com a tenacidade do compósito Poliéster - Juta com reforço do cordão 10/2 não tratado (B1). Entretanto, o efeito do tratamento com isocianato foi maior, aumentado a tenacidade do compósito. Já os tratamentos de

modificações realizadas na matriz poliéster do compósito com reforço do cordão do tipo 10/4 aumentaram a tenacidade do compósito. O efeito foi maior para o tratamento com isocianato. É possível que a modificação da matriz poliéster tenha tenacificado mais o compósito Poliéster - Juta com reforço do cordão do tipo 10/4.

Tabela 24 - Valores de tenacidade (K_C) para o compósito Poliéster - Juta versus o tratamento realizado no reforço e na matriz poliéster. Reforço com cordão de juta do tipo 10/4.

Tipo do Cordão	Tipo do Tratamento	Teor de Fibra	K_C (MPa.m ^{1/2})	
			\bar{K}_C	s
-	RP	0,00	1,17	0,07
10/4	B2 ⁽¹⁾	13,82	3,33	0,31
10/4	TU2 ⁽²⁾	10,89	3,92	0,86
10/4	TP2 ⁽²⁾	12,57	3,84	0,37
10/4	TI2 ⁽²⁾	12,58	3,97	0,44
10/4	MU2 ⁽³⁾	14,67	4,26	0,24
10/4	MP2 ⁽³⁾	14,93	4,27	-
10/4	MI2 ⁽³⁾	14,79	3,46	0,32

Simbologia, ver tabela 17.

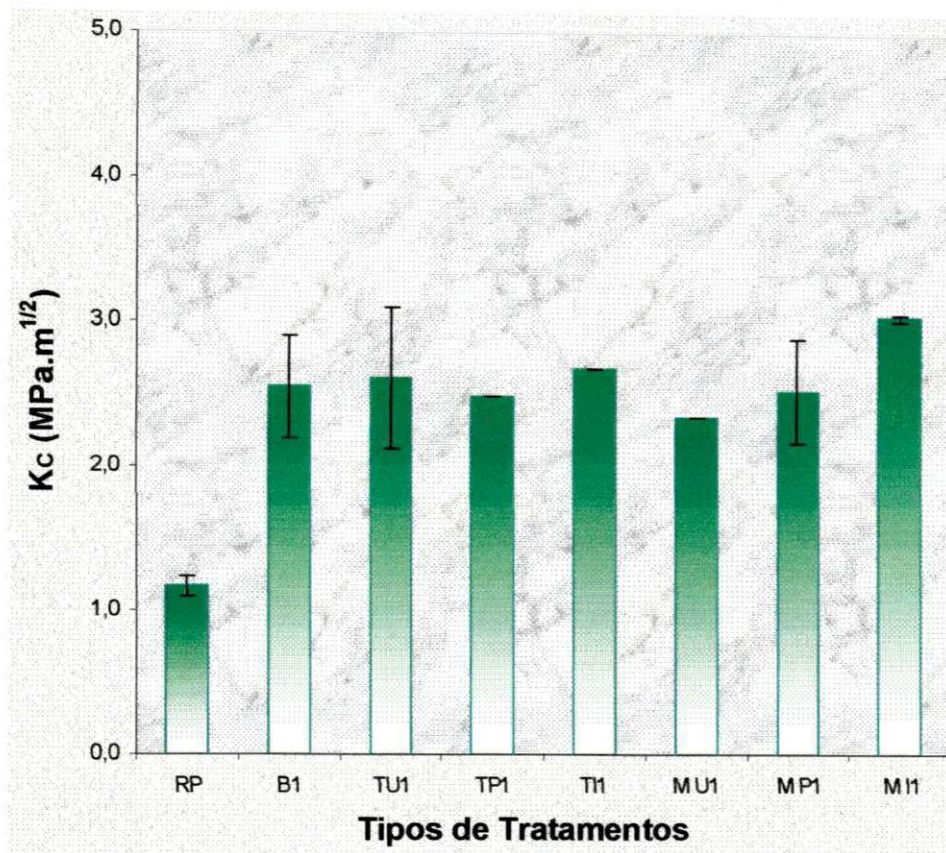


Figura 45 - Influência do tratamento do cordão e da matriz poliéster do compósito Poliéster - Juta na tenacidade (K_c). Cordões de juta do tipo 10/2 com seus respectivos desvios padrão.

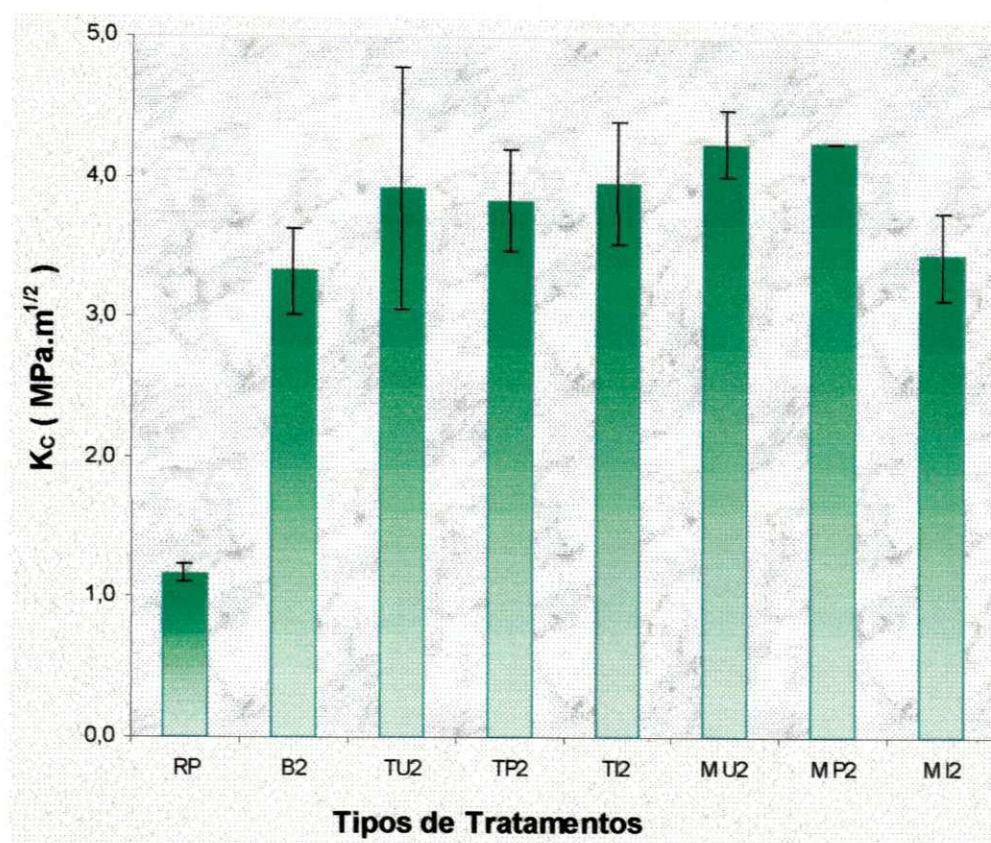


Figura 46 - Influência do tratamento do cordão e da matriz poliéster do compósito Poliéster - Juta na tenacidade (K_c). Cordões de juta do tipo 10/4 com seus respectivos desvios padrão.

Conclui-se com estes resultados, neste momento, que a tenacidade do compósito Poliéster - Juta aumenta com a fração volumétrica e que a modificação da matriz no compósito reforçado com cordão do tipo 10/4 tende a elevar o valor da tenacidade em relação ao reforço 10/4 bruto (B2).

6 - CONCLUSÃO

Os tratamentos superficiais dos cordões de juta com os agentes modificadores à base do óleo de mamona afetaram as propriedades mecânicas dos compósitos Poliéster - Juta. Neste trabalho, fica evidenciado que:

- 1 - as propriedades mecânicas tênsis dos cordões de juta (10/2) apresentaram comportamentos distintos para os tratamentos superficiais realizados;
- 2 - as propriedades mecânicas dos compósitos aumentam com o teor em peso de fibra de juta;
- 3 - o tratamento do reforço com o pré-polímero isocianato promoveu um melhor desempenho nas propriedades mecânicas dos compósitos Poliéster - Juta reforçado por cordões de juta 10/2. Este comportamento não se verificou para os compósitos reforçados por cordões grossos (10/4);
- 4 - a baixa resistência ao impacto apresentada pelos compósitos reforçados por cordões de juta finos (10/2) é atribuída a sua baixa fração volumétrica. A utilização de cordões grossos (10/4) como reforço levou a um aumento nesta propriedade;
- 5 - a introdução de reforço na matriz poliéster elevou a tenacidade (K_C). Por outro lado, observou-se um aumento na tenacidade com a fração volumétrica do reforço no compósito;
- 6 - os tratamentos superficiais dos cordões de juta não promoveram mudança significativas nos valores de tenacidade dos compósitos reforçados com grossos (10/4) e finos (10/2);

7 - a modificação da matriz poliéster com os agentes uretano e poliol promoveram um aumento na tenacidade para o compósito reforçado por cordões grossos (10/4);

8 - a modificação da matriz poliéster com os agentes acoplantes não levaram a grandes variações nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados por cordões do tipo 10/2, comportamento este que não refletido nos compósitos reforçados por cordões de juta grossos (10/4), onde diferenças de comportamento mecânico foram observados.

7 - SUGESTÕES

1. Realizar estudos de intemperismo em compósito Poliéster - Juta;
2. observar o efeito da pós cura no compósito Poliéster - Juta com reforço tratado e não tratado e com matriz modificada;
3. verificar as características interfaciais dos compósitos Poliéster - Juta em função dos tratamentos nos cordões e na matriz por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e óptica para análise de fratura mecânica;
4. confeccionar compósitos híbridos Poliéster - Juta - Fibra de Vidro, comparando suas propriedades com a dos compósitos convencionais;
5. usar no compósito como reforço a própria fibra de juta e comparar com os resultados obtidos com o reforço na forma de cordão de juta;
6. trabalhar com um número maior de corpos de prova para que se possa ser mais conclusivo com relação aos efeitos das variáveis em jogo;
7. no ensaio de tenacidade, trabalhar com corpos de prova de dimensão maiores;
8. estudar o compósito Poliéster - Juta para ambos os casos: cordões de juta e matriz com tratamento semelhante ou não;
9. verificar as propriedades do compósito quando o reforço fica sujeito a tratamento superficial a tempos variados.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) MATTOSO, L. H. C.; FRAGALLE, E. P. - **Uso de Fibras Vegetais na Indústria Automobilística: Necessidade Ecológica, Oportunidade para o Brasil** - Polímeros: Ciências e Tecnologia, Nº 1, pg. 9, Jan./Março 1996.
- 2) SHAH, A. N.; LAKKAD, S. C. - **Mechanical Properties of Jute-Reinforced Plastics**, Fibre Science and Tecnology, vol. 15, 41, 1981.
- 3) BLASS, A. - **Processamento de Polímeros**, 2ª. ed., Editora da UFSC, (1988)
- 4) FLINN, R.; TROJAN, P. - **Engineering Materials and Their Applications**, Houghton Mifflin company, Boston, 1981.
- 5) BUSIGIN, C., et al - **Factores Affecting the Mechanical Properties of Mica-Filled Polypropylenes**, Polymer Engineering and Science 23, pg. 766 - 770 (1983).
- 6) HAGE, E. Jr. - **Compósitos e Blendas Poliméricas**, Campinas. Instituto Latino Americano e IBM Brasil, (1989).
- 7) HULL, D. - **Introduction to Composite Materials**, Cambridge University Press, Cambridge, (1989).
- 8) D'ALMEIDA, J. R. M. - **Propriedades Mecânicas de Fibras de Juta**, Ciência e Cultura, IME (RJ.), vol. 39, 1023, 1987.

- 9) TOLEDO FILHO, R. D. - **Reforços Naturais - Estrutura e Propriedades Mecânicas**, Curso de Pós-Graduação, PUC - Rio de Janeiro, 1993.
- 10) BLEDZKI, A. K ; REIHMANE, S.; GASSAN, J. - **Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers for Natural Fiber Composites**, Journal of Applied Science, Vol. 59, 1329, 1996.
- 11) ERHARDT, THEODOR; et al - **Curso Técnico Têxtil - Ficha Química Aplicada - Têxtil Tecnologia**. Trad. de Jacob Furtener, São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo, 1973 vol. 2, pg. 31-33.
- 12) RIBEIRO, S. U. - **Coleção Artes e Ofícios - Manual de Fiação do Algodão**, Edições LEP Ltda., São Paulo, pg. 26 - 28.
- 13) BARKAKATY, B. C. - **Some Structural Aspects of. Sisal Fibers**. Journal of Applied Polymer Science, vol. 20, 2921, 1976
- 14) DUNDEE - **British Jute Trade Research Association**, Kinnoull Road, Kingsway West, Dundee. A Short Guide To Jute, August. 1962.
- 15) CARVALHO, A. F., et al - **Plástico Reforçado, a Alternativa Inteligente para a Indústria Moderna**: Guia do Plástico Reforçado, São Paulo, 10, 1989.
- 16) ALBA S.A. - **Indústria de Plásticos Reforçados com Fibras de Vidro na Fabricação de Equipamentos Industriais. Resistentes à Corrosão**. Publicação Interna.

- 17) MOHANTY, A K.; MISRA, M. - **Studies on Jute Composite - A Literature Review**, Polymer Plastics Technol. Eng., 34(5), 729, 1995.
- 18) AMINABHAVI, T. M. ; CASSIDY, P. E. - **Journal Polymers Materials** , 2, 186, 1985.
- 19) BATISTA, W. W. - **Propriedades Mecânicas do Compósitos Poliéster/Juta. Efeitos dos Tratamentos Superficiais**, Dissertação de Mestrado em Engenharia química, UFPB, 1995.
- 20) LAUKE, B.; SCHULTRICH, B.; POMPE, W. - **Theoretical Considerations of Toughness of Short - Fiber - Reinforced Thermoplastics**, Polymer - Plast. Technol. Eng., 29 (7 & 8), 607 - 806, 1990.
- 21) LIEBOWITZ, H. - **Fracture-An Advanced Treatise**, Academic Press, vol. 2, New York and London, 1968.
- 22) BROECK, D. - **Elementary Ebgineering Fracture Mechanics**, Leyden, 1974.
- 23) CHEREPANOV, G. P. - **Mechanics of Brittle Fracture**, McGraw - Hill, New York, 1979.
- 24) POMPE, W., et al - **Mechanical Properties of Brittle Materials, Modern Theories and Experimental Evidence**, in Current Topics in Materials Science, Elsevier, Vol. 12, 262. 1985.

- 25) FRIEDRICH, K. - **Microstructure and Fracture of Fibre Reinforced Thermoplastic Polyethylene Terephthalate**, Fortschr. Ber. VDI-Zeitschr., Reihe 18, No. 12, Düsseldorf, 1982.
- 26) FRIEDRICH, K. - **Fracture Mechanical Behaviour of Short Fibre Reinforced Thermoplastics**, Fortschr. Ber. VDI-Zeitschr., Reihe 18, No. 18, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.
- 27) FRIEDRICH, K. - **Microstructural efficiency and Fracture Toughness of Short Fiber / Thermoplastic Matrix Composites**, Composites Sci. Technol., vol. 22, 43, 1985.
- 28) HARRIS, B. - **Engineering Composite Materials**, The Institute of Metals, London, 1986.
- 29) TSANAS A.; KARDOS, J. L. - **Fracture Toughness of Short Fiber Reinforced Composites**, ANTEC, 377, 1985.
- 30) GAGGAR, S.; BROUTMAN, L. J. - **Crack Growth Resistance of Random Fibre Composites**, Journal Composites Materials, 9, 216, 1975.
- 31) AGARWAL, B. D.; GIARE, S. G. - **Crack Growth Resistance of Short Fibre Composite**, Fibre Sci. Technol., 15, 283, 1981.
- 32) GUESS, T. R.; HOOVER, W. R. - **Fracture Toughness of Carbon-Carbon Composites**, Journal Materials Science, 7. 2. 1973.

- 33) GRELLMANN, W. - **Beurteilung der Zähigkeitseigenschaften von Polymerwerk - Stoffen Durch Bruchmechanische Kennwerte**, Thesis (B), TH Merseburg, 1985.
- 34) HOFFMANN, H. - **Untersuchungen zum Einfluß von Füllstoffen auf die Zähigkeitseigenschaften von PE-HD**, Plaste und Kautschuk, 32, 10, 1985.
- 35) OUTWATER, J.; MURPHY, M. C. - **24th Annual tech. Conf. Reinforced Plastics Composites**, Div. Of SPI, Paper 11c, 1969.
- 36) CURTIS, P. T., et al - **The Stiffness and Strength of a Polyamide Thermoplastic Reinforced with Glass and Carbon Fibres**, Journal Materials Science, 13, 377, 1978.
- 37) PIGGOTT, M. R. - **The Effect of Aspect Ratio on Toughness in Composites**, Journal Materials Science, 9, 494, 1974.
- 38) MARSTON, T. U., et al - **Interfacial Fracture Energy and the Toughness of Composites**, Journal Materials Science, 9, 447, 1974.
- 39) PIGGOTT, M. R. - **Load Bearing Composites**, Pergamon Press. Oxford, 1980.
- 40) KELLY, A. - **Interface Effects and the Work of Fracture of a Fibrous Composite**, Proc. Roy. Soc., London, A319, 95, 1970.
- 41) HARRIS, B., et al - **Fracture Mechanisms in Glass Reinforced Plastics**, Journal Materials Science, 10, 2050, 1975.

- 42) HARRIS, B. - **Micromechanisms of Crack Extension in Composites**, Metall. Sci., 14, 351, 1980.
- 43) WELLS, J. K.; BEAUMENT, W. R. - **Crack-Tip Energy Absorption Processes in Fibre Composites**, Journal Materials Science, 20, 2735, 1985.
- 44) WELLS, J. K.; BEAUMENT, W. R. - **Debonding and Pull-out Processes in fibrous Composites**, Journal Materials Science, 20, 1275, 1985.
- 45) BAER, E.; MOET, A. - **High Performance Polymers**, Carl Hanser Verlag, Ney York, 162, 1991.
- 46) CARVALHO, L. H.; e RUDIN, A. - **Journal Applied Polymer Science**, 29, 2921 1984.
- 47) SAMAL, R. K.; BHUYAN, B. L. - **Journal Applied Polymer Science**, 52, 1675, 1989.
- 48) CORAN, A. Y.; PATEL, R. - **U. S. Patent** 4, 323, 625 1982.
- 49) ZADORECKI, P.; FLODIN, P. - **Journal Applied Polymer Science**, 30, 3971, 1985.
- 50) HUA, L.; ZADORECKI, P.; FLODIN, P. - **Journal Applied Polymer Science**, 8, 199, 1987.

- 51) PRASAD, S. V.; PAVITHRAN, C.; ROHATGI, P. K. - **Alkali Treatment of Coir Fibre for Coir-Polyester Composites**, Journal of Materials Science, 18, 1443, 1983.
- 52) CHAWLA, K. K., et al - **Comportamento Mecânico dos Conjugados de Resina Poliéster e Fibras de Carbono, Kevlar-29, Sisal e Vidro**, Revista Bras. Tec., vol. 9, 79, 1978.
- 53) SATYANARAYANA, et al - **Fabrication and Properties of Natural Fibre Reinforced Polyester Composites**, Composites, Vol. 17, N° 4, 1986.
- 54) RAJ, R. G., et al - **Use of Wood Fiber in Thermoplastics VII. The Effect of Coupling Agents in Polyethylene-Wood Fiber Composites**, Journal of Applied Polymer Science, vol. 37, pg. 1089, 1989.
- 55) MALDAS, D., et al - **Influence of Coupling Agents and Treatments on the Mechanical Properties of Cellulose Fiber-Polystyrene Composites**, Journal of Applied Polymer Science, vol. 37, pg. 751, 1989.
- 56) CLARK, R. A.; ANSELL, M. P. - **Jute and Glass Fibre Hybrid Laminates**, Journal of Materials Science, 21, 269, 1986.
- 57) SRIDHAR, M. K., et al - **Mechanical Properties of Jute-Polyester Composites**, Indian Journal of Technology, vol. 22, 213, 1984.
- 58) SEMSARZADEH, M. A.; AMIRI, D. - **Bonders for Jute-Reinforced Unsaturated Polyester Resin**, Polymer Engineering and Science, vol. 25, 618, 1985.

- 59) CARVALHO, L. H., et al - **Anais 2º do Simpósio Latino Americano de Polímeros**, v.1, 102, 1994.
- 60) ARRUDA, G. S. - **Desenvolvimento do Compósito Poliéster/Juta: Um estudo Comparativo**, UFPB, PGEQ, 1994.
- 61) PAL, P. K. - **Jute Reinforced Plastics, A Low Cost Composite Material**, *Plastics and Rubber Processing and Application*, 4, 215, 1984.
- 62) GHOSH, P.; GANGULY, P. K. - **Plast. Rugg. Composites Proc. Appl.**, 20(3), 171, 1993.
- 63) IDRIS, A. K. M., Et al - **Journal Applied Polymer Science**, 54, 303, 1994.
- 64) VARMA, I. K.; ANANTHA KRISHNAN. S. R.; KRISHNAMOORTHY - **Text. Res. J.**, 58, 537, 1988.
- 65) VARMA. I. K.; ANANTHA KRISHNAN, S. R.; KRISHNAMOORTHY - **Composites**, 20 (4), 383, 1989.
- 66) GHOSH, P.; GANGULY. P. K. - **Journal Applied Polymer Science**, 52, 77, (1994).
- 67) CARVALHO, L. H.; BATISTA, W. W. - **Anais do 3º CBPOL**, vol. 2, 892. 1995.
- 68) CHOI, N. S. ; YAMAGUCHI, H. ; TAKAHASHI, K. - **Fracture Behavior of Unidirectional Commingled Yarn Based Carbon Fiber Polyamide 6**

- Composite under Three-Point Bending**, Journal of Composite Materials, Vol. 30, N° 7, pg. 760, 1996
- 69) PIGGOTT, M. R. - **Shorth Fiber Polymer Composites: A Fracture Based Theory of Fibre Reinforcement**, Journal of Composite Materials, Vol. 28, N° 7, pg. 588, 1994.
- 70) CARLING, M. J. ; WILLIAMS, J. G. - **Fiber Length Effects on the Fracture of Short Fiber Composite**, Polymer Composites, Vol. 11, N° 6, pg. 307, 1990.
- 71) RESANA S/A, **Poliéster Insaturado - Resapol**, Tecnologia de Processos, Publicação Interna.
- 72) PROQUINOR, Boletim Técnico. Publicação Interna. São Paulo, 1996.
- 73) ASTM - Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, ASTM D - 638-87, Philadelphia, 1987.
- 74) ASTM - Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, ASTM D - 790-86, Philadelphia, 1986.
- 75) ASTM - Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, ASTM D - 256-90, Philadelphia, 1990.
- 76) ASTM - Annual Book of ASTM Standard. Test Method for Plane - Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. ASTM E - 399-83, Philadelphia, PA, USA, 1983.

- 77) WILLIAMS, J. G.; CAWOOD, M. J. - **European Group on Fracture: K_c and G_c Methods for Polymers**, vol. 9, 15 - 26, 1990.

ANEXO IIa) Sistemática para o cálculo de K_Q (K_C).

- ⇒ A configuração do corpo de prova deve está de acordo com a norma, figura 21, da seção 4.2.3.3.
- ⇒ A trinca artificial deve está de acordo com o estabelecido pela norma, ver seção 4.2.3.3.
- ⇒ A relação $P_{max} / P_{5\%}$ da curva carga versus deslocamento do ponto de aplicação da carga não deve exceder 10%, ou seja, $P_{max} / P_{5\%} < 1,1$ para permanecer dentro das condições de LEFM, WILLIAM e CAWOOD [77].
- ⇒ O cálculo de $P_{5\%}$ é realizado pela inclinação da tangente mais 5% da curva carga versus deslocamento do ponto de aplicação da carga.
- ⇒ Se as condições acima descrito forem satisfeita, calcula o fator de ajuste para o corpo de prova flexão em três pontos dada pela equação (10) da seção 4.2.3.3.
- ⇒ Então, pode-se calcular K_Q pela equação (11) da seção 4.2.3.3.

As curvas experimentais para o cálculo de K_C é apresentada na figura 1, abaixo.

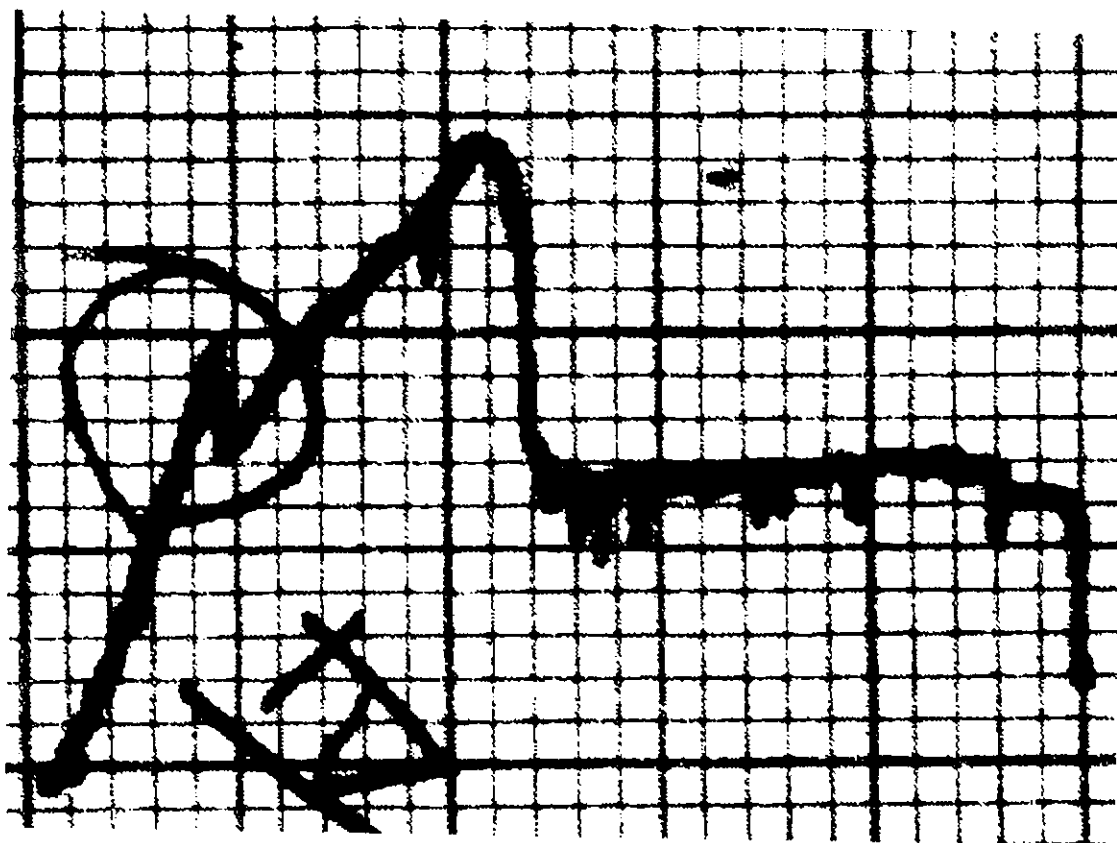


Figura 1 - Curva experimental para o cálculo de K_c . Nesta figura observa-se os dois picos na curva carga versus ponto de deslocamento da carga, onde foram calculados K_{QA} (K_0') e K_{QB} (K_0'').

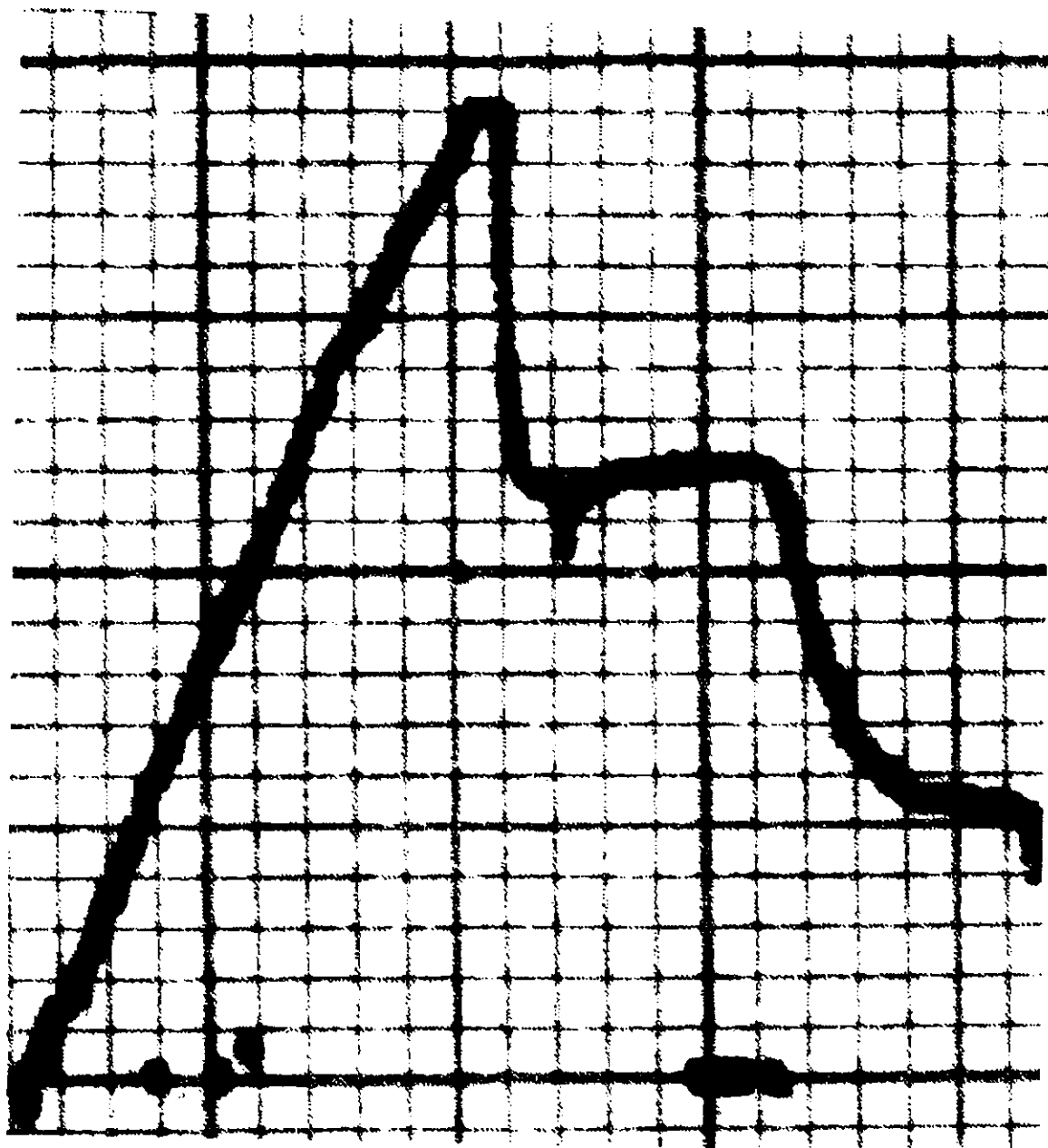


Figura II - Curva experimental para o cálculo de K_c . Nesta figura observa-se um pico na curva carga versus ponto de deslocamento da carga, onde foram calculados K_{0c} (K_0'').

Tabela I - Valores de K_c encontrados dos compostos Poliéster - Juta.

Tipo de Cordão	Tipo de Tratamento	Teor de Fibra	Cálculo K_c (MPa(m) ^{1/2})					
			K'_c	s	K''_c	s	K'''_c	s
-	RP	-	-	-	-	-	1,17	0,07
10/2	B1	5,50	0,96	0,42	2,23	0,54	2,55	0,35
10/2	TU1	5,89	1,12	0,13	2,53	0,74	2,61	0,49
10/2	TP1	7,91	1,09	0,18	1,94	0,41	2,49	-
10/2	TI1	5,23	1,01	0,09	2,43	0,21	2,68	-
10/2	M U1	6,17	1,22	0,12	2,20	0,37	2,35	-
10/2	M P1	5,31	0,96	0,15	2,46	0,35	2,53	0,36
10/2	M I1	5,73	1,38	0,06	2,42	0,11	3,04	0,02
10/4	B2	13,01	1,00	0,17	3,16	-	3,33	0,31
10/4	TU2	13,64	1,27	0,10	3,26	0,80	3,92	0,86
10/4	TP2	12,57	-	-	-	-	3,84	0,37
10/4	TI2	13,76	1,24	0,19	3,45	0,80	3,97	0,44
10/4	M U2	10,36	-	-	-	-	4,26	0,24
10/4	M P2	11,02	-	-	-	-	4,27	-
10/4	M I2	13,14	1,06	0,15	4,00	-	3,46	0,32

ANEXO IIb) Curvas carga versus deformação dos cordões de juta.

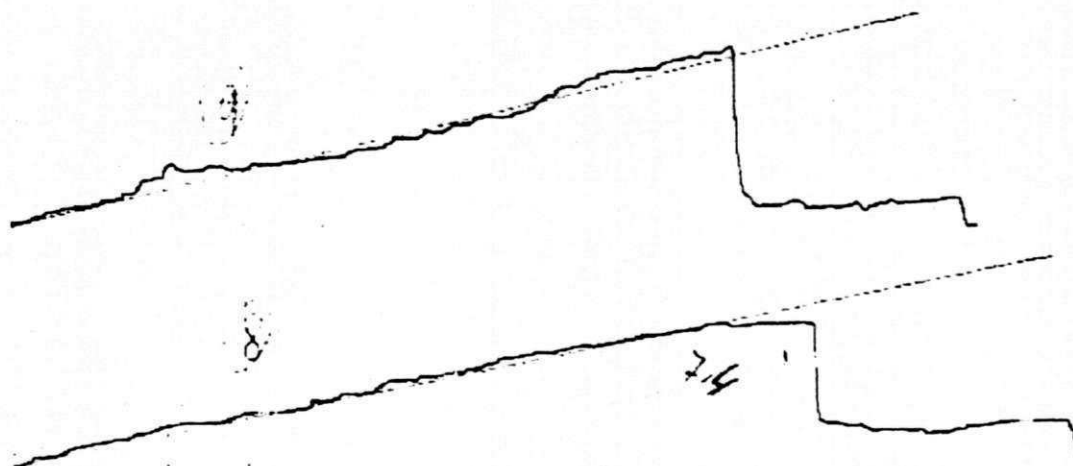


Figura III - Curva carga versus deformação do cordão de juta do tipo 10/2.

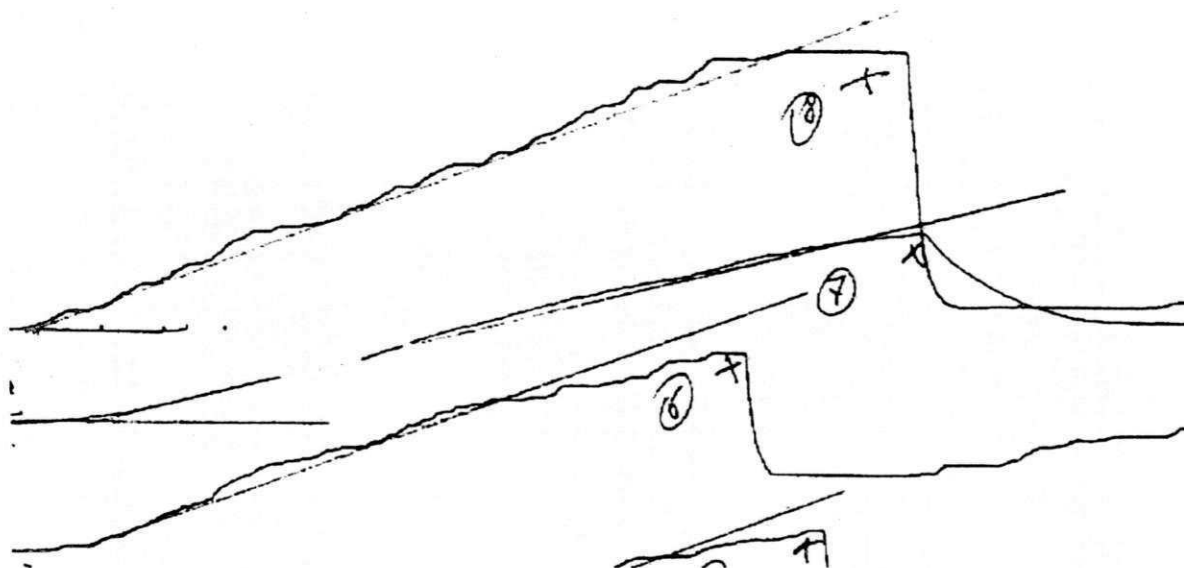


Figura IV - Curva carga versus deformação do cordão de juta do tipo 10/4.

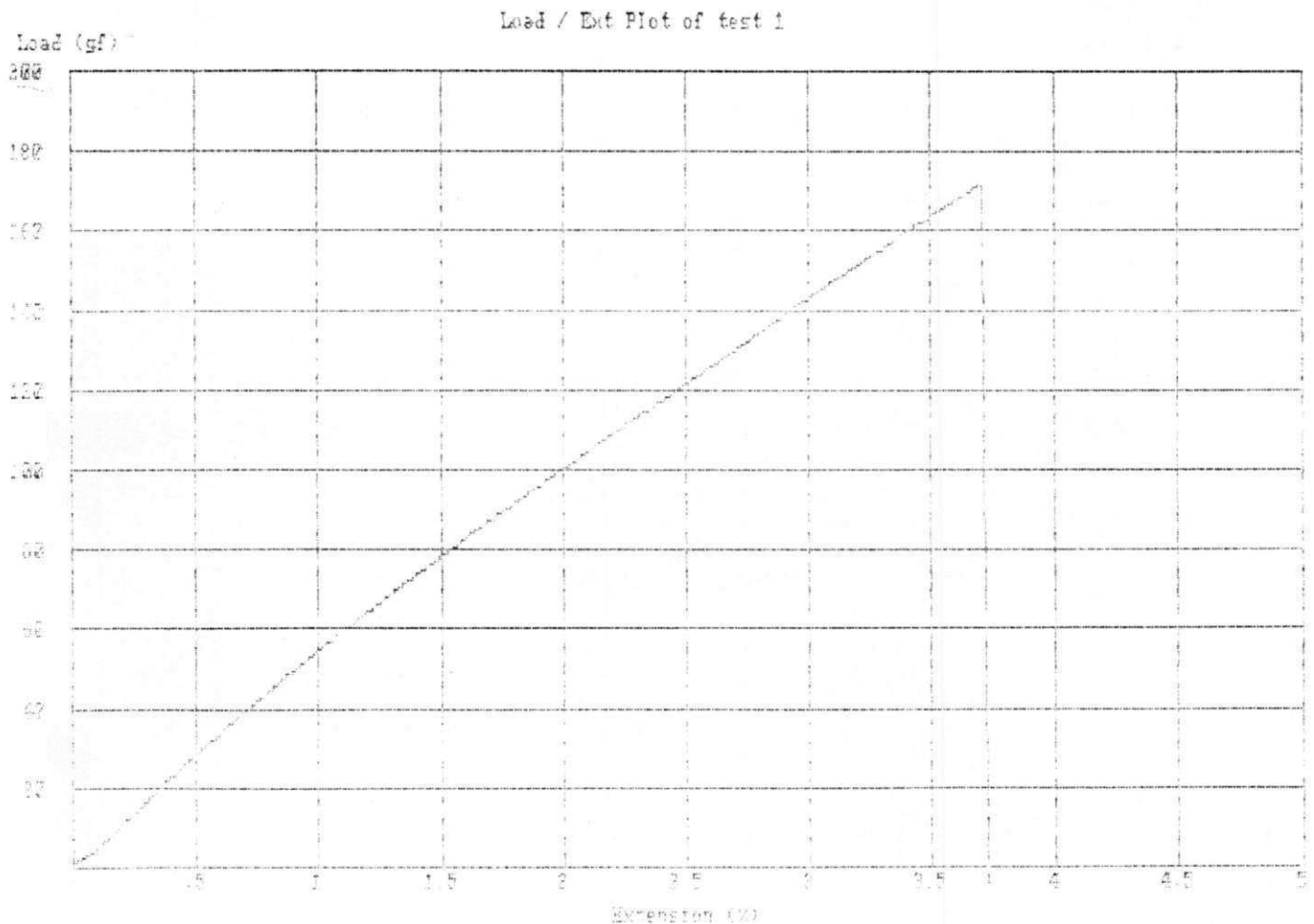
ANEXO II c) Curvas carga versus deformação dos compósitos Poliéster - Juta.

D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

REFERENCE 1 : COMPOSITO FID 10 / 4	TEST SPEED : .5 mm/min
REFERENCE 2 : BRUTA	SAMPLE LENGTH : 55 mm
REFERENCE 3 : AMOSTRA 2B - 3	SAMPLE WIDTH : 12.1 mm
DATE TESTED : 07-03-97	PRE-TENSION : 1 gf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (gf)	TENSILE STRENGTH (gf/mm ²)	ELONGATION (%)	YOUNG'S MODULUS (gf/mm ²)	EXT à YIELD POINT (gf/mm ²)
1	3.2920	172.50	4.3306	3.7455	122.32	3.7091

TEST No.	STRESS à .5 % (gf/mm ²)	STRESS à 1 % (gf/mm ²)	STRESS à 2 % (gf/mm ²)	STRESS à 2.5 % (gf/mm ²)	STRESS à 3.5 % (gf/mm ²)
1	0.7054	1.3557	2.5105	3.0439	4.1059



D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

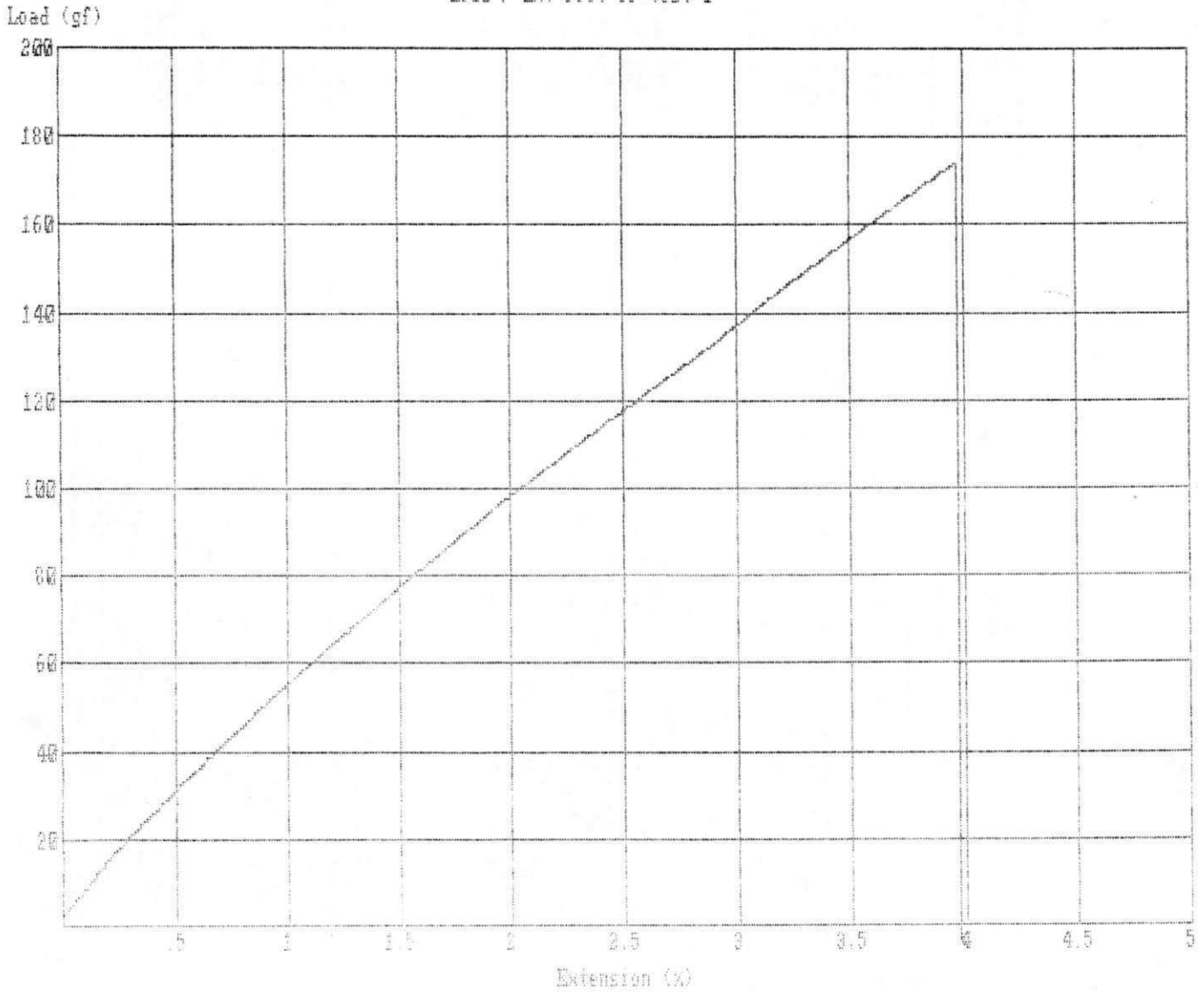
REFERENCE 1 : COMPOSITO FIO 10/2
 REFERENCE 2 : ISOCIANATO NA MATRIZ
 REFERENCE 3 : AMOSTRA IV
 DATE TESTED : 05-08-97

TEST SPEED : .5 mm/min
 SAMPLE LENGTH : 75 mm
 SAMPLE WIDTH : 12.3 mm
 PRE-TENSION : 2 gf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (gf)	TENSILE STRENGTH (gf/mm ²)	ELONGATION (%)	YOUNGS MODULUS (gf/mm ²)	EXT @ YIELD POINT (gf/mm ²)
1	2.7940	174.20	5.0689	4.0107	132.06	4.0400

TEST No.	STRESS @ .5 % (gf/mm ²)	STRESS @ 1 % (gf/mm ²)	STRESS @ 1.5 % (gf/mm ²)	STRESS @ 2 % (gf/mm ²)	STRESS @ 2.5 % (gf/mm ²)
1	0.9007	1.6093	2.2468	2.8636	3.4180

Load / Ext Plot of test 1



D638M PLASTIC TENSILE TEST RESULTS

REFERENCE 1 : COMPOSITO FIO 10/2
 REFERENCE 2 : URETANO NA MATRIZ
 REFERENCE 3 : AMOSTRA I
 DATE TESTED : 05-08-97

TEST SPEED : .5 mm/min
 SAMPLE LENGTH : 75 mm
 SAMPLE WIDTH : 12.6 mm
 PRE-TENSION : 2 gf

TEST No.	THICKNESS (mm)	PEAK LOAD (gf)	TENSILE STRENGTH (gf/mm)	ELONGATION (%)	YOUNGS MODULUS (gf/mm)	EXT @ YIELD POINT (gf/mm)
1	2.8770	169.70	4.6814	3.7498	128.45	3.7600

TEST No.	STRESS @ .5 % (gf/mm)	STRESS @ 1 % (gf/mm)	STRESS @ 1.5 % (gf/mm)	STRESS @ 2 % (gf/mm)	STRESS @ 2.5 % (gf/mm)
1	0.8777	1.5385	2.1688	2.7358	3.3241

Load / Ext Plot of test 1

